

数字孪生城市研究报告

(2019 年)

中国信息通信研究院
2019年10月

版权声明

本研究报告版权属于中国信息通信研究院及数字孪生城市研究合作伙伴，并受法律保护。转载、摘编或利用其它方式使用本研究报告文字或者观点的，应注明来源。违反上述声明者，本院将追究其相关法律责任。

致 谢

2018 年，中国信息通信研究院联合业内知名企业，围绕数字孪生城市的概念、内涵和总体架构，进行研讨并发布了数字孪生城市研究报告（2018 年）。进入 2019 年，面对各地数字孪生城市规划和建设的迫切需求，中国信通院再次牵头组织业界，尤其是与城市三维建模密切相关的创新型企业，聚焦数字孪生城市建设要素之核心平台、关键技术和典型场景，开展深入研究，旨在融会贯通细化建设方案，引领各地政府和相关产业，推进数字孪生城市落地实施。本次报告编制过程中合作企业提供了大量素材并直接参与了部分章节的撰写，在此致以衷心感谢。限于时间和能力，内容疏漏在所难免，烦请各界不吝指正。

牵头单位：中国信息通信研究院

支持单位：泰瑞数创、51VR、超图公司、中电海康集团研究院、中科院地理科学与资源研究所、中科院生态环境研究中心、中科院广州电子技术有限公司、国家互联网应急中心、中国电信、中国移动、中国联通、腾讯等

编写指导：何桂立、胡坚波、王爱华、陈金桥、徐志发

编写小组（排名不分先后）：高艳丽、陈才、张育雄、崔颖、刘小林、夏磊、张竞涛、张东、黄栋、刘晓伦、石伟伟、陈正、马亮、刘笑寒、王蕊、陈守双、王瑜、周旗、肖丽、熊锐、李翀、陈婉玲、王潇、孙旭、李文卿、刘中金、周玉科等

前 言

数字孪生城市理念自提出以来不断升温，已成为新型智慧城市建设的热点，受到政府和产业界的高度关注和认同。当前，各地对数字孪生城市规划和建设的需求非常强烈，但数字孪生城市究竟如何建设，各方仍是感到非常困惑，技术方案和实施路径亟待规范和明晰。本报告通过对数字孪生城市所涉及的关键技术以及技术之间的集成关系、所包含的核心平台以及平台之间的协同性，以及体现数字孪生特色的典型应用场景进行深入剖析，力图对数字孪生城市的建设方案进行通用化提炼抽取，并对国内外相关产业和服务供给进行梳理，从而为各地建设实施数字孪生城市提供帮助和引导。

从关键技术看，与传统智慧城市相比，数字孪生城市技术要素更复杂，不仅覆盖新型测绘、地理信息、语义建模、模拟仿真、智能控制、深度学习、协同计算、虚拟现实等多技术门类，而且对物联网、人工智能、边缘计算等技术赋予新的要求，多技术集成创新需求更加旺盛。其中，新型测绘技术可快速采集地理信息进行城市建模，标识感知技术实现实时“读写”真实物理城市，协同计算技术高效处理城市海量运行数据，全要素数字表达技术精准“描绘”城市前世今生，模拟仿真技术助力在数字空间刻画和推演城市运行态势，深度学习技术使得城市具备自我学习智慧生长能力。

从核心平台看，数字孪生城市在传统智慧城市建设所必须的物联网平台、大数据平台、共性技术赋能与应用支撑平台基础上，增加了城市信息模型平台，该平台不仅具有城市时空大数据平台的基本功能，更重要的是成为在数字空间刻画城市细节、呈现城市体征、推演未来趋势的综合信息载体。此外，在数字孪生理念加持下，传统的物联网平台、大数据平台和共性技术赋能与应用支撑平台的深

度和广度全面拓展，功能、数据量和实时性大大增强，如与数字孪生相关的场景服务、仿真推演、深度学习等能力将着重体现。

从应用场景看，数字孪生城市的全局视野、精准映射、模拟仿真、虚实交互、智能干预等典型特性正加速推动城市治理和各行业领域应用创新发展。尤其在城市治理领域，将形成若干全域视角的超级应用，如城市规划的空间分析和效果仿真，城市建设项目的交互设计与模拟施工，城市常态运行监测下的城市特征画像，依托城市发展时空轨迹推演未来的演进趋势，洞察城市发展规律支撑政府精准施策，城市交通流量和信号仿真使道路通行能力最大化，城市应急方案的仿真演练使应急预案更贴近实战等。在公共服务领域，数字孪生模拟仿真和三维交互式体验，将重新定义教育、医疗等服务内涵和服务手段。同时，基于个体在数字空间的孪生体，城市将开启个性化服务新时代。

从未来发展看，随着数字孪生城市建设持续深入和功能的不断完善，未来生活场景将发生深刻改变，超级智能时代即将到来。同时，技术加速集成创新将打破智慧城市现有产业格局，促使产业重新洗牌，新的独角兽可能出现。此外，技术的变革将倒逼管理模式的变革，正如生产力进步引发生产关系的变化，数字孪生城市的建设和运行，将推动现有城市治理结构和治理规则重塑调整。

目 录

一、 数字孪生城市发展概况.....	1
(一) 理念引领, 各地纷纷提出建设数字孪生城市	1
(二) 产业响应, 各类企业抢抓商机激活 ICT 产业链	2
(三) 资本助力, 数字孪生城市板块崛起倍受市场关注	4
(四) 场景先行, 数字孪生部分应用先行先试初显成效	4
二、 数字孪生城市总体架构与核心平台	8
(一) 三横两纵总体架构	8
(二) 泛在感知与智能设施管理平台	11
(三) 城市大数据平台	13
(四) 城市信息模型平台	16
(五) 共性技术赋能与应用支撑平台	18
三、 数字孪生城市关键技术要素	21
(一) 新型测绘: 快速采集地理信息	21
(二) 标识感知: 实时“读写”真实城市	27
(三) 协同计算: 高效处理海量数据	33
(四) 全要素表达: 精准“描绘”城市前世今生	36
(五) 模拟仿真: 在数字世界推演城市运行态势	44
(六) 深度学习: 推动城市自我学习智慧成长	48
四、 数字孪生城市典型应用场景	53
(一) 城市规划仿真: 形成全局最优决策	53
(二) 城市建设管理: 项目进度可视化管控	55
(三) 城市常态管理: “一盘棋”综合治理	59
(四) 交通信号仿真: 最大化道路通行效能	62
(五) 应急演练仿真: 应急预案更加贴近实战	67
(六) 公共安全防范: 让“雪亮”更“明亮”	70
(七) 公共服务升级: 感同身受的体验	72

五、 数字孪生城市未来发展展望..... 74

（一）有望全面激活智慧城市产业..... 74

（二）有望重塑城市治理结构和规则..... 75

（三）数字孪生城市的推进实施建议..... 76

一、数字孪生城市发展概况

数字孪生城市理念自提出以来，在国内政产学研用各界引起广泛关注，掀起研究和建设热潮。数字孪生城市已成为各地政府推进智慧城市建设的主流模式选择，产业界也将其视为技术创新的风向标、发展的新机遇，数字孪生应用已在部分领域率先展开。

（一）理念引领，各地纷纷提出建设数字孪生城市

雄安新区率先推进数字孪生城市建设。2018 年《河北雄安新区规划纲要》中指出：坚持数字城市与现实城市同步规划、同步建设，打造具有深度学习能力、全球领先的数字城市。目前，新区正推进 BIM 管理平台（一期）建设，这是一个具有国家自主产权的数字城市规建管智能审批平台，通过创新城市“规、建、管”的新型标准体系、政策体系和流程体系，探索以数字城市的预建、预判、预防来支撑现实城市高质量发展的模式，打造展现多维城市空间的数字平台。平台将建立不同阶段的城市空间信息模型和循环迭代规则，采取 GIS 和 BIM 融合的数字技术记录新区成长的每一个瞬间，结合 5G、物联网、人工智能等新型基础设施的建设，逐步建成一个与实体城市完全镜像的虚拟世界。

全国各地抢抓先机，开展数字孪生城市规划和建设。数字孪生城市为各地智慧城市建设提供了新思路、新模式，让城市治理者看到城市现代化治理体系以及高质量发展的曙光，让城市居民憧憬随需而动、无处不在的智能化服务。2019 年 5 月，在第二届数字中国建设峰会数字经济分论坛上，贵阳副市长徐昊发表了“数字孪生城市的贵阳探索”主题演讲。在实践上，贵阳提出从花果园超大型社区治理、数博大道等小型城市生态系统入手打造数字孪生城市。南

京江北新区着力推动城市发展向智能化高级形态迈进，提出力争到2025 年率先建成“全国数字孪生第一城”。浙江省发布未来社区建设试点实施方案，制定“未来社区”九大场景，提出构建现实和数字孪生社区要求。舟山市、西咸新区、重庆市、长三角一体化示范区等地纷纷采用数字孪生城市的建设理念和模式，先后制定智慧城市顶层设计和规划，以数字孪生城市为导向推进智慧城市建设。

（二）产业响应，各类企业抢抓商机激活 ICT 产业链

数字孪生城市正在激活庞大的信息技术产业链。数字孪生城市自提出以来，吸引产业界广泛关注，成为技术创新和业务拓展的重要方向。多地学术机构开展关于“数字孪生”的专题研讨，探索数字孪生技术对于城市治理、工业制造等领域的应用和价值。以 BIM、CIM(City Information Model)、VR/AR、AI 等先进技术为主攻方向的科技公司发力“数字孪生”方案研发，并已应用到多个行业。数字孪生城市涉及技术门类较多，诸如新型测绘、地理信息、物联感知、三维建模、图像渲染、虚拟现实、仿真推演、深度学习、智能控制等，几乎涉及信息产业所有链条，无论是传统的智慧城市龙头企业，还是新入局的创新型中小企业，对数字孪生城市均给予了高度重视，各类企业依托自身优势加紧布局，抢占市场先机，同时推动技术方案不断完善。

传统智慧城市厂商顺势而为推出数字孪生城市解决方案。科大讯飞打造数字孪生城市的“城市超脑”，基于互联网、物联网等基础设施，汇聚城市时间与空间数据，运用人工智能算法，挖掘城市发展与运行轨迹，进行即时分析和仿真建模，促进物理城市公共资源最优化。软通动力与华为合作，发布支持数字孪生城市的 aPaaS 平台，为多个场景提供 API 服务，涵盖交通、环保、安全等各种领

域。阿里巴巴联合千方科技、银江股份、浙大中控、数源科技、海康威视等众企业，基于阿里云平台，共同打造数字孪生城市大脑，提升杭州市交通系统和城管系统的智能化水平。紫光云集成数字孪生底座，推出“1+4+N”智慧城市应用体系，重点打造安全生产“大数据”分析预测能力和“物联网”动态感知能力，有效防范和遏制重特大事故发生。

空间信息产业纷纷入局，成为数字孪生城市建设中坚力量。数字孪生和空间信息产业密切相关，需要空间信息采集、建模、开发、服务、应用全产业链的深度参与，同时空间信息产业通过数字孪生在智慧城市中找到了新的支点，多年的技术积累在巨大的市场空间得以释放活力，并造就独特的竞争优势。国内 GIS 领头企业超图公司在新推出的新一代三维 GIS 技术体系中，全方位支持倾斜摄影建模、激光点云、BIM 等多源异构的三维模型数据，并推出国内首个三维空间数据规范标准 Spatial 3D Model (S3M)，该标准融合了倾斜摄影模型、BIM、精模、激光点云、矢量、地下管线、地形、动态水面、三维栅格等多源数据，突破了大规模三维数据传输和解析的技术瓶颈，进一步促进了数字孪生的广泛应用。泰瑞数创提供了涵盖高端航测传感器、数据采集、处理服务到应用开发的数字孪生城市建模全产业链服务，还发布实景世界云平台 SmartEarth，利用结构化语义模型整合了 BIM / CAD 和地理测绘等技术，高效自动地构建城市信息模型，已经成功应用于智慧城市、智慧工业和自动驾驶等领域。51VR 公司运用 GIS、高程、无人机斜拍点云、卫星图、街景图等技术和数据，能够快速自动化构建大规模数字孪生城市模型，复原城市的每个细节，并进行大场景动态实时渲染，在数据可视化和场景可视化基础上，实现城市运营管理的可视化和精细化。

（三）资本助力，数字孪生城市板块崛起倍受市场关注

智慧城市相关投资持续保持高速稳定增长。IDC 预计，中国智慧城市技术相关投资在 2016-2021 年间将保持年复合增长率 19.3% 的稳定增长。根据 IDC《全球半年度智慧城市支出指南》发布的数据，2018 年中国智慧城市技术相关投资达到 208 亿美元，相比 2017 年的 173 亿美元增长了 20.2%，成为全球第二大的智慧城市技术相关支出市场（仅次于美国）。数字孪生城市的提出，无疑为新型智慧城市建设注入了新的活力，不仅带动相关产业的技术研发投入，而且促进地方政府加大对智慧城市的建设投资。

数字孪生相关企业获得资本青睐，斩获融资。2017 年 5 月，英国虚拟仿真初创公司 Improbable 完成了 5.02 亿美元的 B 轮融资，由软银国际领投，公司估值突破 10 亿美金。该公司基于 Google 的计算平台“SpatialOS 平台”，构建了一个基于蜂窝云服务的“超级虚拟世界”。2019 年以来，我国以数字孪生为概念的多只股票出现涨停，数字孪生城市的价值被资本市场初步认同。看好数字孪生创新发展前景，资本巨头积极投资数字孪生相关企业，如阿里巴巴入股银江股份，超图公司获得中国人寿与光大银行的定向增发融资。51VR 完成 B 轮 2.1 亿元融资，泰瑞数创获得启迪金控和中信建投等机构过亿元投资。

（四）场景先行，数字孪生部分应用先行先试初显成效

数字孪生技术重新定义智慧园区。据预测，到 2022 年，85% 的物联网平台将使用数字孪生技术进行监控，产业园区有望率先利用数字孪生技术，重塑园区管理与服务模式。在华为和 51VR 联合研发数字孪生的深圳坂田园区及东莞松山湖园区，通过实时接入园区 IOT 设备、资产、能源、设施及环境等信息，建立基于园区实时运

行状况的数字孪生场景，实现园区运营的可视分析、园区业务的闭环联动、园区决策的仿真模拟以及园区数据的全量集成，开创新一代园区的立体多维管理新模式。华为在廊坊经济技术开发区，利用GIS 空间信息平台，构建虚拟城市数字资源体系，一方面支撑 IOC 运营，同时为各个政务部门提供全空间的地理信息服务。





图 1 数字孪生智慧园区

大型工业生产制造数字孪生风行。通过数字孪生模型与仿真技术，对高成本高复杂性大型设备产品进行设计、生产、装配全流程的数字化，并借助传感器实时数据与运行数据，实现对设备产品的远程监控和预测性维护，已成为大型工业制造企业的共识。西门子建立了贯穿于产品生命周期各环节间的数据模型，仿真模拟一些工厂的实际操作空间；通用电气与 ANSYS 公司借助数字孪生概念，提出物理机械和分析技术融合的实现途径，让每个引擎，每个涡轮，

每台核磁共振都拥有一个数字化的“双胞胎”；德国软件公司 SAP 利用数字孪生概念，在产品试验阶段采集设备的运行状况，通过分析后得出产品的实际性能，再与需求设计的目标比较，从而形成产品研发的闭环体系。波音 737 MAX8 不到半年发生两次重大事故，而数字孪生技术可用于航空飞机的维护与保障。美国空军已经和波音合作构建了机体数字孪生模型。波音公司在最新的 NMA 项目上，已经率先使用数字孪生技术进行研究。泰瑞数创在能源电力行业，利用数字孪生技术建立了电厂规划设计和运营服务的一体化系统，目前已经在国家能源集团和中石油等企业投入使用。

数字孪生提升智能驾驶试验精度。通过搭建真实世界 1:1 数字孪生场景，还原物理世界运行规律，满足智能驾驶场景下人工智能算法的训练需求，大幅提升训练效率和安全度。如通过采集激光点云数据，建立高精度地图，构建自动驾驶数字孪生模型，完成厘米级道路还原，同时对道路数据进行结构化处理，变现为机器可理解的信息，通过生成大量实际交通事故案例，训练自动驾驶算法处理突发场景的能力，最终实现高精度自动驾驶的算法测试和检测验证。

数字孪生在医疗领域获得突破性进展。数字孪生给予健康医疗新的视角和手段，通过对身体器官、血液循环、神经系统、肌体骨骼、心率脉搏等进行“镜象映射”，建立人体的数字孪生体，进而通过人体标准数据库，记录人体每个细节特征，进行人体健康的实时动态管理。通过引进小型化的穿戴式设备，实时对人体进行数据收集。孪生数据还可来源于 CT、核磁、心电图、彩超等医疗检测和扫描仪器检测的数据，血常规、尿检、生物酶等生化数据，医疗机构基于人体数字孪生综合数据，可对患者提供健康状况预测与及时

干预，同时人体的数字孪生还将大大提高诊断的准确性和手术的成功率。

数字孪生为智慧校园经济管理赋能。数字孪生将学校物理空间与数字空间有机衔接，全面感知校园物理环境，建立智能舒适的生活与教育环境，实现二维三维一体、虚实一体的校园精细化管理。我国多所大学已建立三维数字校园信息系统，在地上地下一体化、室内室外一体化的全三维校园空间信息中整合地下管理、能源、安全等多种传感器信息，实现对校园后勤资源、教学教育设施、能源管控、校园安全等多种管理功能。

二、数字孪生城市总体架构与核心平台

（一）三横两纵总体架构

本质上，数字孪生城市是面向新型智慧城市的一套复杂技术和应用体系，多门类技术的集成、多源数据的整合和各类平台功能的打通是数字孪生城市成功的关键要素。

因此，数字孪生城市并没有脱离智慧城市的总体架构布局，由新型基础设施、智能运行中枢、智慧应用体系三大横向层，以及城市安全防线和标准规范两大纵向层构成。

区别在于延展与增强。技术体系内涵延展，新增强化了新型测绘、标识感知、三维建模、仿真模拟等技术应用，核心平台能力增强，强化了全要素数字表达、大数据模型驱动与反向智能控制，应用体系更强调集约一体，突出跨领域、跨行业、全域视角的超级应用地位。

城市新型基础设施包括全域感知设施(包括泛智能化的市政设施和城市部件)、网络连接设施和智能计算设施。与传统智慧城市不同的是，数字孪生城市的基础设施还包括激光扫描、航空摄影、移动

测绘等新型测绘设施，旨在采集和更新城市地理信息和实景三维数据，确保两个世界的实时镜像和同步运行。

智能运行中枢是数字孪生城市的能力中台，也是城市大脑，由五个核心平台承载，一是泛在感知与智能设施管理平台，对城市感知体系和智能化设施进行统一接入、设备管理和反向操控；二是城市大数据平台，汇聚全域全量政务和社会数据，与城市信息模型平台整合，展现城市全貌和运行状态，成为数据驱动治理模式的强大基础。三是城市信息模型平台，与城市大数据平台融合，成为城市的数字底座，是数字孪生城市精准映射虚实互动的核心。四是共性技术赋能与应用支撑平台，汇聚人工智能、大数据、区块链、AR/VR等新技术基础服务能力，以及数字孪生城市特有的场景服务、数据服务、仿真服务等能力，为上层应用提供技术赋能与统一开发服务支撑。五是泛在网络与计算资源调度平台，主要是基于未来软件定义网络（SDN）、云边协同计算等技术，满足数字孪生城市高效调度使用云网资源，由于本部分内容发展尚不充分，未纳入本次研究范围。

智慧应用体系不仅包括基于数字孪生内核的各行业领域应用，如城管、应急、医疗等，更包括凸显数字孪生“一盘棋”管理特征的超级应用，如城市画像、人口画像、虚拟服务、决策仿真等。



图2 数字孪生城市总体架构

随着城市数据的不断汇聚累积，各类新技术交叉集成创新赋能，以及共性应用支撑能力加大封装力度，数字孪生城市的智能中枢作为连接底层终端设施、驱动上层行业应用的核心环节，在传统智慧城市重大平台的建设基础上，进一步形成泛在感知与智能设施管理平台、城市大数据平台、城市信息模型平台、共性技术赋能与应用支撑平台等核心平台。



图3 数字孪生城市核心平台与传统智慧城市平台关系

（二）泛在感知与智能设施管理平台

泛在感知与智能设施管理平台，是终端设备与智能应用之间的纽带。是数字孪生城市的基础性支撑平台，以全域物联感知和智能化设施接入为基础，以统筹建设运维服务为核心，以开放共享业务赋能为理念，服务于设备开发者、应用开发者、业务管理者、运维服务者等各参与者，向下接入设备，兼容适配各类协议接口，提供感知数据的接入和汇聚，支持多级分布式部署，推进信息基础设施集约化建设，实现设备统筹管理和协同联动；向上开放共享数据，为各类物联网应用赋能，支撑物联数据创新应用的培育。物联感知平台是数字孪生城市与真实世界的连接入口，泛在感知粒度决定数字孪生城市的精细化程度。

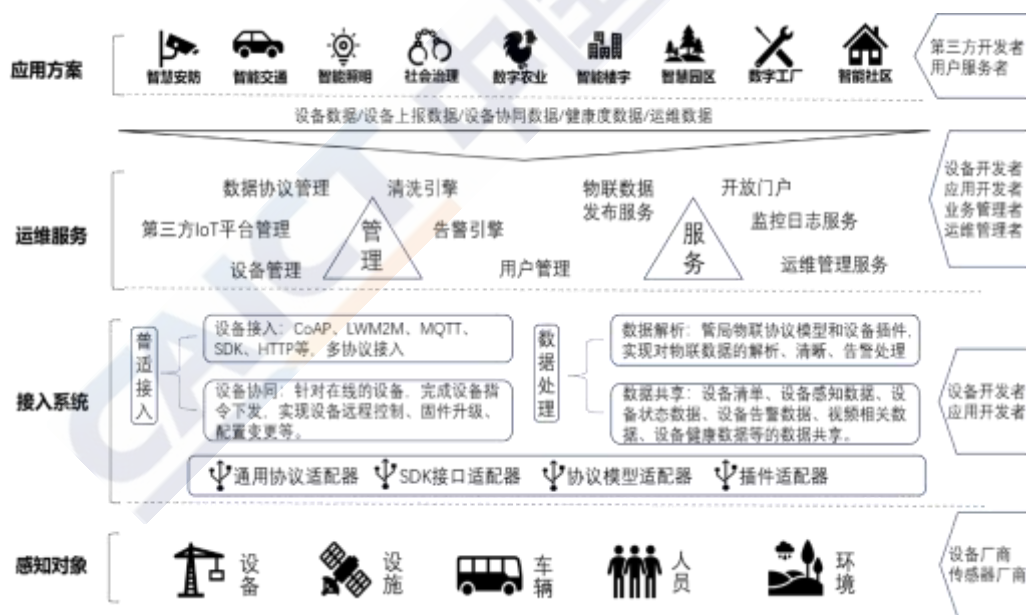


图4 泛在感知与智能设施管理平台功能架构

1、接入管理。针对不同类型感知设备采用的多种传输协议接口，平台提供通用协议适配模块、接口适配模块、协议模型适配模块、插件适配模块等，支持 CoAP、LWM2M、HTTP、MQTT 等多种协议接口，确保各类感知终端设备统一接入。各类行业通常自建的业务系统，

可通过 SOA/DOA 等方式接入到城市大数据平台，也可通过部署行业传感器的方式接入到泛在感知与智能设施管理平台。

2、数据管理。平台根据物联网协议模型和设备插件，对各类感知设备采集的数据进行解析、清洗、预处理，并通过调用开放 API 接口，为设备管理、上层应用开发提供高质量数据支撑服务，包括数据协议管理、数据分析、数据统计、数据调用等。

3、设备管理与反向控制。面向城市能源设施、水利设施、交通设施、通信设施、环卫设施、防灾设施、建设设施、地下管廊等各类设施中的感知终端，平台将根据设备开发者、应用开发者、业务管理者、运维服务者不同业务需求，提供设施设备健康状态监测管理、远程运营维护、设备远程指令控制、故障问题告警等管理和服务能力。

通过泛在感知与智能设施管理平台，城市建筑、桥梁、道路、管网、灯杆等公共基础设施可实现“被感知”，从而提高设施的安全性和可维护性；交通违章、违法停车、垃圾满溢、井盖破损等城市运行状态及市容秩序可实现“智能发现”，为非现场执法和政府监督管理提供技术保障，提高城市管理效能，提升城市品位和形象；车辆、人员等位置及移动轨迹可实现“被追溯”，从而提高城市管理力量和资源的科学调度，用数据管理。

目前，国内的城市物联网平台主要聚焦在设施管理、生态监测、物流运输、智能抄表等领域，城市级物联网平台建设仍处于起步探索阶段，在技术功能、领域覆盖、建设模式等方面有待完善。例如，重庆市巴南区打造的物联网管理平台，覆盖区域面积达 83.08 平方千米，主要对超过 63 万个城市部件进行统一管理。上海市制定出台

《新型城域物联专网建设导则》，对全市感知设备的部署进行统筹指导和规范约束，明确泛在感知与智能设施管理平台的技术架构，各区县、街道按照统一架构自行建设区域内平台，实行分级部署和分层管理，形成市-区-街道三级物联感知体系。

（三）城市大数据平台

数字孪生城市的数据资源体系具备三个特征：**一是从政务信息资源到城市大数据的转变**。数据更加多元多源，从政府业务数据扩展到感知数据、互联网数据、企业数据等，实现从封闭自用的政务信息资源到多方共建共享共用的城市大数据的跨越。**二是与物理世界动态连续映射**。所有主体数据都将叠加时空信息，每个物理实体任何时间、任何地点的状态，均可以映射到数字孪生世界，实现物理实体在时空上的连续精准映射。**三是从封闭割裂到有机整体的跨越**。以往每一条独立的空间地理数据、建筑数据、业务数据、传感器数据、互联网数据如今均可关联到实体上，形成该实体的全量属性数据，并以实体为基础形成城市知识图谱。

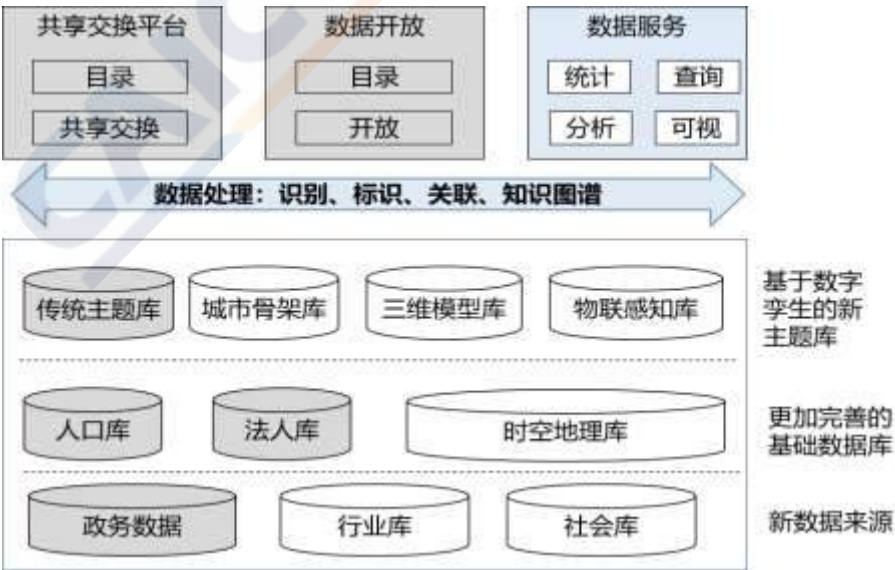


图5 城市大数据平台的功能架构

数字孪生城市以城市信息模型为底座，以物理实体映射的一个

个数字孪生体为对象，将城市大数据作为对象的属性进行叠加。与传统智慧城市相比，数字孪生城市不仅包括传统测绘数据、新型测绘数据等常规 GIS 数据类型，也包括基于倾斜摄影、BIM、激光点云的三维模型数据，基于移动互联网的地理位置数据、基于物联网的实时感知数据等，以及非结构化的视频、图片、文档等。城市大数据平台以城市 BIM 数据为骨架，整合城市规划、建设、管理等数据，同时不断融入物联网感知数据、位置数据和各种运行数据，保证城市数据的实时性，展示城市真实运行状态。除此之外，通过对接已建政务系统、行业系统的政务数据和行业数据，实现城市数据的协同共享。

城市信息模型的数据组织应基于开放共享的城市信息模型和三维传输交换标准来构建。城市信息模型可参照国际标准组织 OGC 框架下的 CityGML 标准实现。CityGML 核心模块定义了 CityGML 数据模型的基本概念和组件。基于 CityGML 核心模块，每个模块包含一个逻辑上独立的主题组成的 CityGML 数据模型。具有十三个专题扩展模块包括外观、桥、建筑、城市部件、城市目标组类、泛型、土地利用、救援物资、交通、隧道、植被、水体以及纹理面。CityGML 数据模型的主题分解可以实现支持任何组合的扩展模块与核心模块。扩展模块可以根据应用程序或应用领域的信息需求任意组合。城市三维信息的传输和交换，国际上最常用的有开源的 3D Tiles 格式，国内可采用中国地理信息产业协会审查批准的《空间三维模型数据格式》（T/CAGIS 1—2019）团体标准，这些格式适用于海量、多源异构三维地理空间数据和 Web 环境下的传输与解析，为多源空间数据在不同终端（移动设备、浏览器、桌面电脑）地理信息平台中的存储、高效绘制、共享与互操作等问题提供了解决方案。

基础数据需要融合处理。融合处理方法通常包含：一是识别，主要针对空间测绘图像数据和半结构文本类数据。对图像数据目前多采用机器学习中卷积神经网络图片识别的方法进行识别，如识别出空间数据中的道路、桥梁、建筑、井盖等等；对半结构化文本数据多采用语义识别的方法进行识别。二是标识，识别出的数据对象需要进行标签化处理，才能被业务系统使用。数据对象通常会关联到一套标识系统之上，用来对数据标识对象的唯一性进行识别。例如建筑物编号、建筑物内房间编号、房间内门窗编号等等。三是关联，不同数据对象之间存在一定的关联关系，例如井盖对象与部署在井盖内的传感器实时数据之间的关联关系；道路网格数据与部署在道路上的不同视频监控设备关联关系等。四是知识图谱，不同的数据对象关联后形成不同类别的知识图谱。

城市大数据平台对外提供各层次数据服务。一是基础数据，包含城市各类基础设施等相对不变的结构化文本描述数据，如道路桥梁、人口经济等数据，通过 SOA、DOA 等多种组件模型对外部系统提供统计查询、挖掘分析等服务。二是空间数据，包含城市各类基础设施等相对不变的图形图像数据，以结构化文本方式对外提供显示服务，同时可结合图形处理引擎，以 3D 的方式提供 VR\AR 交互展示服务。三是业务数据，一般是动态变化的数据，包含城市内交通流量、教育医疗、气候环境、城市能耗等数据。四是专题数据，指面向不同专题领域，关联基础数据、空间数据和业务数据的融合数据。

城市大数据服务平台已初露端倪。部分地区提出建设城市级大数据平台，但内涵与数字孪生城市数据平台仍存在较大差距。数字孪生城市新增城市骨架库、实体信息库和城市运行库等数据库。大部分城市的数据平台以数据库和共享交换平台为主，少数发达地区

正在向具有横向贯通、统一运营、一站服务能力的综合性数据服务平台转型。如北京市提出建设统一的市级大数据管理平台，建立共享交换平台、清洗平台、存储平台、数据开放平台等 9 个功能，实现数据资源的全量汇聚编目和按需留存使用，但距离数字孪生城市多源融合的时空全量数据仍有很大差距。

（四）城市信息模型平台

实时映射的城市信息模型平台是数字孪生城市建设的核心，是刻画城市细节、呈现城市趋势、推演未来趋势的综合信息载体。城市信息模型平台是指具有城市语义信息的三维模型，是语义建模的数据成果，其核心功能主要由模型数据源采集、模型平台构建、数据呈现与模型渲染三大部分组成。

1、多源模型数据采集是模型平台构建的基础。目前广泛应用于建筑物、构筑物、道路、地下管线、地质、水体和地表高程属性数据和纹理数据的采集方法有传统三维建模软件、三维激光扫描、航空摄影测量、移动测绘系统等。数据类型主要包括基础地理数据、BIM/CAD 建筑模型数据、城市街景数据、倾斜摄影数据、激光点云数据等多源异构的三维数据。

2、模型平台是数字孪生城市运行“骨架”（信息载体）。主要是基于城市 GIS 地图，利用影像多视匹配技术、点云构 TIN 技术、纹理映射技术、三维模型存储优化技术等建模技术，按照地形层、道路层、建筑层、绿化层、水域层等顺序逐层从城市大数据平台加载数据组建而成，并对建筑物、桥梁、停车场、绿地等城市部件进行单体化处理。在模型单体化的基础上，利用语义化技术，可以形成一个量化并可索引的城市单体信息模型（类似于传统的 BIM），同步可以接入人口、房屋、公司法人、安防设施、公安警务数据、住户

水电燃气信息、交通信息、公共医疗等诸多城市公共系统的信息资源。

3、实时数据呈现与模型渲染是模型赋能业务应用的核心基础。

第一方面是物联网感知数据实时在模型平台上快速加载、融合和实时呈现，实现实时运行监测数据可视化，如实时视频图像、空气污染指数、交通流量、行人轨迹等；第二方面是根据城市地理信息数据源、模型精度、业务场景需求，不同精度标准呈现现实场景，如城市管理应用场景可以按百米级或十米级呈现，交通、应急等特殊场景的模拟仿真和 AI 训练可以按照米级或厘米级呈现；第三方面是对数据模拟和真实场景效果渲染，比如通过图形学技术，对光源、聚光灯、天光等多种光源类型的实时模拟；根据天气动态数据如云层高度、风向、边缘噪波尺寸等，对阴、晴、雨、雪等多种真实天气的模拟；运用动态光追踪距离场阴影技术，实时计算阴影状态，最终模拟还原物理世界的运行情况。

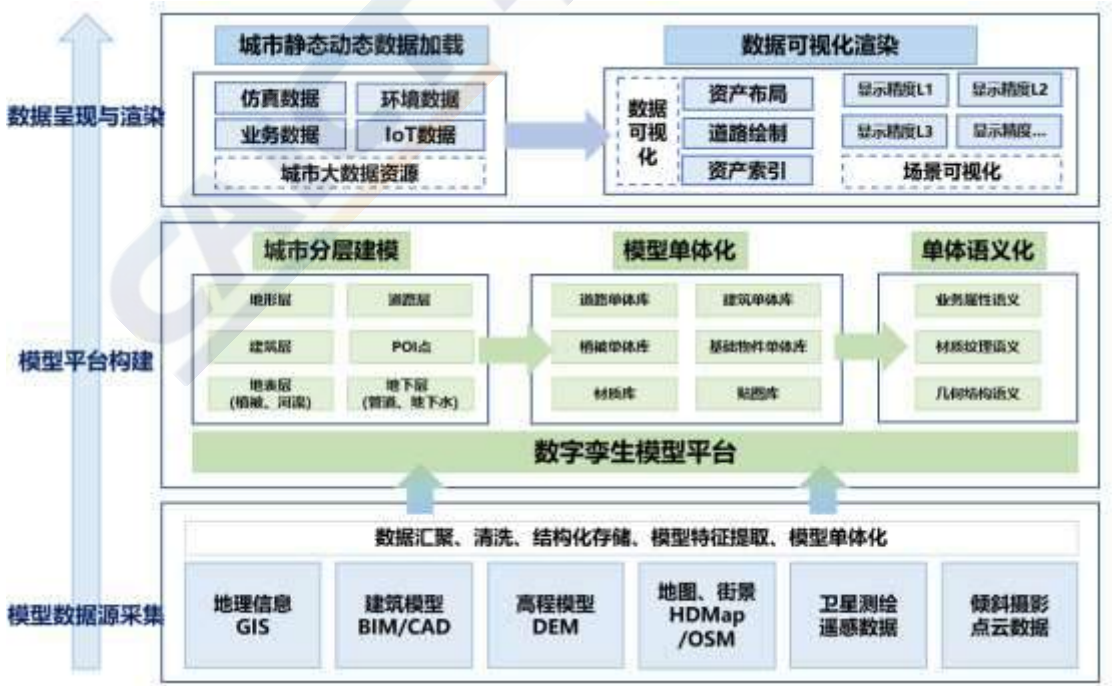


图 6 城市信息模型平台的三层架构

模型平台全面激活数据资源价值，助力模拟仿真城市运行状态。

城市信息模型平台源于智慧城市时空大数据平台，是时空大数据平台的演进和再发展。在数据集成范畴，模型平台集成了与城市经济社会运行的各类数据和物联感知数据，不仅仅局限于城市静态数据呈现；在城市运行模拟上，模型平台运用模拟仿真、深度学习等技术，仿真推演城市发展态势；在实时数据呈现上，模型平台集成了智能终端运行数据，可视化展示城市运行状态，可动态预警城市问题；在支撑政府决策上，模型平台可快速模拟管理者决策效果，支撑城市管理者制定全局最优化决策方案。

总体上看，四大阵营已初步形成，但整体发展仍处于初级阶段。一是传统地理信息和测绘相关企业基于多年建设时空大数据平台经验，构筑数字孪生城市先发优势，如 GIS 平台产品企业超图公司、提供语义数据服务和全产业链平台的泰瑞数创等；二是传统 BIM 企业扩大建设范畴，逐渐转向城市、园区领域搭建一体化 CIM 平台，如广联达软件、鲁班软件等；三是传统 3D 建模、模拟仿真类企业借助制造业、交通等领域积累的优势，快速进军城市信息模型市场，搭建城市模型平台，如 51VR、达索系统等；四是传统智慧城市厂商、运营商纷纷着手与模型企业合作，开始布局城市信息模型市场，如中国电信、华为等。从建设进展看，各大阵营企业基本搭建完成城市信息模型的“骨架”，但对城市运行机理和规则的实时模拟仿真、对全域数据的深度学习自我优化等方面的能力构筑上，受制于机制、关键技术等因素，仍处于探索阶段。

（五）共性技术赋能与应用支撑平台

共性技术赋能与应用支撑平台是城市关键共性技术、应用开发组件和城市模型服务组件的模块化封装集成平台，是整个数字孪生城市的“决策大脑”。

从核心功能来看，平台为上层的数字孪生应用提供底层技术支撑、元数据集、城市元部件模型等资源，实行自定义分析与调用、灵活配置和高效开发利用。功能架构包括三大类：第一类是核心使能共性技术，包括大数据、人工智能（深度学习）、区块链技术等；第二类是面向应用场景的信息模型服务，包括城市场景服务、数据更新和追踪服务、事件模拟仿真推演服务、自定义渲染服务；第三类是基于底层数据的共性应用服务能力，包括信用服务、身份认证、电子证照、非税支付等。



图 7 共性技术赋能与应用支撑平台功能架构

与智慧城市赋能平台相比，数字孪生城市的信息模型赋能服务体现出四大优势。一是场景服务，提供建筑物、城市部件等基础设施的空间地理信息服务。二是数据服务，可获取移动物体的实时动态数据及更新服务，以及提供位置追溯、轨迹跟踪等历史数据管理服务。三是仿真服务，提供事件、场景、决策预案的过程模拟服务，模拟发展变化过程，实现事件、场景、决策预案数字孪生。四是渲染服务，根据城市地理信息数据源、模型精度和制作预算，按照不同精度要求实施渲染效果。

业界企业依托自身优势，探索多样化的共性技术赋能与应用支

撑平台构建模式。由于应用需求分散和企业技术优势不同，业界独立开发三大要素齐全的共性技术赋能与应用支撑平台的实践较少，多数共性技术赋能与应用支撑平台采取与底层大数据平台、数字孪生模型平台等核心平台一体化建设。如泰瑞数创 SmartEarth 数字孪生底座系统集成了时空信息云、语义平台、城市模拟仿真计算平台等模块；51CityOS 城市可视化平台整合了城市感知数据体系、大数据分析平台、CIM 以及部分上层业务应用；阿里、百度智慧城市大脑则综合集成了城市大数据资源体系、大数据分析平台、上层大数据应用开发环境和交通、安防等特定领域信息模型。



图 8 百度智能云+应用支撑赋能平台架构

总体上看，共性技术赋能与应用支撑平台的底层核心技术使能实力较强，但面向城市部件、事件、业务流等实时要素的模型服务仍是最大短板。如目前各大主流互联网企业模型服务重点聚焦少数行业领域，例如对交通服务涉及的车辆特征识别、行为轨迹分析等应用模型服务发展较好，但面向城市全量基础模型的综合服务较少，如模型关联分析、基于模型的仿真推演、自定义渲染等；同时对面向超级应用的共性功能组件考虑不足，是共性技术赋能与应用支撑平台未来需要进一步关注和提升的方向。

三、数字孪生城市关键技术要素

（一）新型测绘：快速采集地理信息

1. 需求分析

测绘地理信息作为经济社会发展和国防建设的重要基础，在信息化建设中起着基础性、保障性和先导性作用。随着“实景三维中国”建设推进，测绘地理信息在经济社会各领域得到广泛应用。数字孪生城市更加需要新型测绘的强力支撑，在时空大数据管理、地理监测、高精度实体化测绘等方面提出更高要求，基于新型测绘构建的城市三维模型是数字孪生城市运行的主要载体。传统基础测绘产品服务模式已难以满足要求，迫切需要转型升级。数字孪生时代下的新型基础测绘有以下几个特点：

一是自动化和软件化水平要求更高，有效避免传统手工测绘方式的人力物力资源浪费和人为误差，利用自动化程度更高的测绘设备和数据处理方法，可快速生产出二维三维、地上地下、室内室外一体化的全息测绘成果，保证测绘成果的准确性和高时效。

二是服务范围要求扩大和智能更新，利用更先进的机载、车载、船载、背包式等新型测绘设备，通过无人船、无人机航拍等新型测绘技术有效覆盖陆地、海洋、空间和地上地下，基于面向地理实体对象的增量式数据更新，实现海量城市实体地理信息的快速更新和动态调整。

三是由按尺度分级的基础地理信息数据库向按地理实体分类的无尺度基础时空数据库转变，通过地理实体建库技术，可实现不同精度、不同层次、不同时相的地理实体数据集成，形成地上地下、室内室外、二维三维、历史现状一体化的全空间城市信息模型，支撑基础地理和城市专题数据融合。

四是数据生产效率要求更高、实时性更好、种类更丰富，更快速满足城市规划、管理、决策系统从二维平面向三维实体升级，同时，其数据体量也越来越大，在数据处理管理、数据查询分析、数据可视化表达方面给传统 GIS 技术提出新的挑战。传统二维 GIS 无法完全显示地形、环境、空间结构，同时传统虚拟三维技术的数据量巨大、成本极高。

五是测绘作业方式更加灵活，采用众包分包的作业方式，通过线上线下的一体化更新机制，可以更好的整合社会资源，快速构建新型基础测绘成果，服务数字孪生城市建设。

2. 核心技术

——**高端采集装备**。近年来，随着倾斜摄影、无人机技术的成熟，可实时、准确地获取城市局部的正射、倾斜或 Lidar 点云数据，大大减少了外业测绘工作量。对于大型的数据采集项目可借助高端的专业装备，国内自主研发的多视角航空摄影测量系统，目前已是国际上幅面最大的多视角航摄仪系统，致力于高效解决城市级倾斜航空摄影任务。适合各类直升机平台的测绘级航摄仪，用于解决城市近机场、繁华地区的城市真三维建模任务。全谱段多模态成像光谱仪，将成像技术和光谱技术结合在一起，在探测物体空间特征的同时对每个空间像元获取带宽为纳米级的连续光谱图像，广泛应用于城市总体规划、城镇生态调查、土地质量监测、河湖水质评估、城市热岛效应分析等领域。高光谱遥感系统，在环境监测、矿产勘探、农业估产、土地精细分类、森林调查、灾害评估、目标搜索、海岸带遥感等多个领域被广泛应用。在测量海底、海岸带、浅滩时可利用机载双频激光雷达设备，能够快速获取特定区域海底地貌并成图。

——**主流测绘方法。**倾斜摄影测量技术基于搭载在同一飞行平台的多台相机，从多视角采集地物影像，可一次性获取几十平方公里的城市建筑物及地形模型，传统采用人工方式一两年才能完成的一个中小城市建模工作，通过倾斜摄影建模方式只需三至五个月即可完成，大大降低经济成本和时间代价。国内对倾斜摄影设备的研发不断进步，通过提升航摄仪的光学性能和定位定姿系统，可直接获取带有高精度姿态位置的原始影像数据，同时实现对地物顶部和侧立面信息的有效纹理采集。三维激光扫描技术又被称为实景复制技术，利用高速激光扫描测量方法和激光测距原理，大面积高分辨率获取被测物体表面的三维坐标、反射率和纹理等密集点云数据，快速复建出被测物体的三维模型及线、面、体等各种图件数据。近年来技术发展迅速，设备小型轻量化，支持手持、车载、船载，无人机挂载等多种方式，成本快速降低，测量速度和测量精度快速提升，最高速度达到 120 万点每秒、精度优于 1mm，在载体高速行进之中，也能快速扫描采集海岸、道路两侧的建筑、道路、井盖、路灯等地物空间位置数据和属性数据，已广泛应用于城市建筑测量、地形测绘、海洋测绘等领域，尤其适合室内、地下或难以访问、危险区域的空间领域测绘。

——**三维建模技术。**实景三维重建技术是依托倾斜摄影测量遥感数据成果，结合摄影测量学、计算机图形学算法，通过自动化处理流程手段，获得三维点云、三维模型、真正射影像(TDOM)、数字表面模型(DSM)等测绘成果模型构建技术。其建模速度快，位置精度和几何精度高，纹理真实性强，具有非常实、细致、具体、有冲击力的视觉感受。**激光点云三维构建技术**体现了数字孪生时代下三维模型自动化构建优势。传统 3D 模型建立采用 CAD 技术、航空摄

影测量技术，利用 2 维信息建立 3D 立方体，其纹理依靠专门的 3D 软件如 3DMAX 等进行人工粘贴，其工作量较大，生产成本也高，而激光点云三维构建技术具备高效率、高精度、高真实感、低成本优势，通过点云构网 TIN 技术，将现有点云进行贴近于显示地物的三维曲面重建，实现多幅建筑物立面的倾斜影像及屋顶垂直遥感影像与三维几何模型的快速、高精度纹理映射。

——**多源数据融合技术**。地理信息的智能处理是测绘技术发展的必然方向，借助人工智能技术可以提高地理信息的获取效率，提升地理信息应用与可视化的效果。在数字孪生时代，以地理信息服务精细化、精确化、真实化、智能化为目标，利用机器学习或深度学习算法以及 SLAM（实时定位与制图）算法对测绘地理大数据进行自动识别、数据挖掘和三维重建，快速提取地物特征、发现隐藏在大数据中的知识和还原地物模型，结合充实各地理实体的社会经济属性，形成涵盖地上地下、室内室外、二维三维一体化的全息、高清、高精的结构化实体和城市数字空间，从较为单一的 GIS 数据升级为融合多源、异构、多时态空间数据，以满足应用和分析的需求，从多源异构数据无缝融合、时空数据库建立和空间数据快速更新等方面入手，为社会各界提供知识服务。在数字孪生时代，测绘地理信息行业从传统的地图产品制作转型为面向城市治理、社会经济、专业建设和大众民生应用的服务行业。

——**移动互联、动态众包数据更新**。在数字孪生时代，智能手机、移动互联网等各种非专业测绘设备通过众包的方式，产生了大量实时的自愿者地理信息，极大地提高了测绘地理信息数据的实时性与丰富性。专业测绘人员可在自愿者地理信息中，抓取感兴趣的文本、图片或视频信息，利用智能处理方法对其进行识别，并与专

业的测绘地理信息数据进行匹配，提供实时性的大众与专业服务。例如，Mapillary 基于自身研发的众源平台，采集公众拍摄的带有空间参考的照片，构建了一套街景地图，且更新及时。由于地图导航在大众生活中的应用不断深化，互联网公司越来越重视地图产品在其产品体系中的作用，测绘地理信息数据的生产也逐渐由专业的测绘地理信息企事业单位向非测绘地理信息专业的公司渗透。例如，百度基于街景车获取的点云和影像数据，利用深度学习、图像识别和自动差分融合等技术，实现了全景地图自动提取道路、建筑物轮廓、警示牌及 POI 信息，自动化识别准确率高达 95%，极大地提高了地图生产效率。

3. 相关产业

国际上实景三维建模工具发展的比较成熟，比较常见的有 Bentley 公司的 ContextCapture、Skyline 公司的 Photomesh、Airbus 的街景工厂等产品。国内三维实景重建研究起步略晚，随着国内相关的研究机构和商业单位积极投入新型测绘三维建模软件的技术研究和软件研发，涌现一大批基于摄影测量的快速三维建模软件，如泰瑞数创的 SmartEarth 遥感像素工厂、武汉天际航的 Infinite3D、中测智绘的 Mirage3D 等。国内产品目前普遍还存在功能不完整、性能不稳定、效率不够高等问题。

微软亚洲研究院正在进行的“城市计算”项目，利用人们的移动特性和地理数据，发掘城市的功能区域类型和分布，对制定合理的城市规划有着及其重要的意义。该项目还可基于人的移动性数据发现不合理道路规划；以及利用高速和环路等主干道将城市分割成区域，分析大规模车流轨迹数据在不同区域之间行驶的特征，发掘城市道路网的不足，为城市规划的优化提供参考建议。

北京市测绘设计研究院立足传统测绘数据优势，结合不同类型的社会属性数据，如互联网数据（导航数据、社交网络数据等）、移动设备数据（手机信令、手环数据等）、传感器数据（位移传感器、速度传感器等）、社会调查数据（调查问卷、在线调查等）等，通过研发空间大数据分析模型，分析了北京市详细的建筑量与人口分布等信息，并将分析结果成功应用于多场景的城市现状评估和未来决策中，为城市体检、规划等重要工作提供决策依据。

重庆市勘测院针对越来越丰富的测绘地理信息大数据，结合自然、人文、经济、规划等数据，对测绘地理信息大数据在城乡规划中的应用进行了探索，形成了一个三维地理空间环境城市用地竖向解决方案，从中发现城市用地变化、城市扩展方向等信息，对城市资源配置作定量定性分析，为城市发展和规划提供知识服务。

上海市测绘院针对海量遥感影像数据的管理和服务应用，研发了基于云计算架构的“遥感影像云服务平台”。该平台采用云计算技术，将海量遥感影像数据分布式存储在云盘，实现共享交换和下载；通过云计算的资源调度分配，可根据用户在线影像处理服务的需求，提供遥感影像的动态裁剪、拼接以及复杂遥感影像分析模型的服务。

宁波市测绘设计研究院充分结合宁波市市情，在第一次地理国情普查的基础上，建设了“宁波市地理市情普查与监测平台”。该平台整合了多尺度的国情普查数据、社会经济数据以及行业数据等，提供了实时数据支持、动态监测和历史数据时空分析等服务，以满足市政府行政决策和民生服务的需要。

武汉市测绘研究院将非专业测绘地理信息数据作为专业测绘地理信息数据采集和更新的有益补充，围绕众源测绘地理信息“发现

-采集-处理-更新”的技术主线，提出了互联网环境下众源测绘地理信息动态更新方法；并以“勘测成果一张图”为基础平台，整合网络地图、网页文本、视频图像等数据，提升“一张图”数据更新速度和在线分析功能，增加了服务的种类和深度。

4. 应用情况

商业应用主要来自政府部门的城市管理需求，在规划、交通、公安、应急、消防、水务、能源等领域实景三维数据应用占据主导地位，并逐渐向着建筑工程、生态环保、文化遗产、景区服务、园区和社区信息化管理等新市场方向广泛渗透。目前重点商用化的应用方向有（1）道路病监测，井盖下沉，道路平整度检查；（2）林地监测管理，电线与树枝打架，剪枝管理；（3）城市设施破损，交通设施破损；（4）违建识别，面积核算；（5）地铁管道变形；（6）暴雨城市桥下过水线识别；（7）公路竣工测量，资产调查与管理。

国内新型测绘短板在应用，如何加强应用，优化迭代出新型的测绘软硬件系统产品，服务行业产业，是提升国内新型测绘产品国际竞争力的核心，也是数字孪生城市成功的关键基础，数字孪生城市的建设与发展将为新型测绘产业提供广阔的市场前景。

（二）标识感知：实时“读写”真实城市

1. 需求分析

数字孪生城市建设需要以全域感知为前提。数字孪生城市的目标是要在数字虚拟空间建立一个与现实物理世界虚实映射、交融互动的数字孪生世界，现实世界中的各类物理实体在孪生空间中都有对应的数字虚体。面向城市建立全域全时段的物联感知体系，实现城市运行态势的多维度、多层次精准监测，是建设数字孪生城市的关键基础。而物体与物体之间，不是单独的个体，物体间协同交互，

需要明确物体在全域的空间位置及唯一标识，并确保设备可信可控。

全域标识能够为物理对象赋予数字“身份信息”，实现孪生映射。

标识技术能够为各类城市部件、物体赋予独一无二的数字化身份编码，从而确保现实世界中的每一个物理实体都能与孪生空间中的数字虚体精准映射、一一对应，物理实体的任何状态变化都能同步反应在数字虚体中，对数字虚体的任何操控都能实时影响到对应的物理实体，也便于物理实体之间跨域、跨系统的互通和共享。

设备可信可控从物联采集源头确保城市运行数据的安全、城市基础设施可靠。物联网设备分布广泛，类型繁多，标准不一，本身的能力和级别也依赖于各个生产厂商。在城市级物联感知体系建设中，需要通过区块链、设备身份认证、数据加密、通道加密等技术，实现终端设备的可信认证、报文不可篡改、设备存储的隐私数据不外露，确保设备的接入安全、数据安全、报文安全。并通过安全态势感知、分析技术，实现设备安全隐患的提前预防。

2. 核心技术

——物体全域标识。物体全域标识是数字城市中各物理城市及新建的城市物联感知体系在城市信息模型平台中的唯一身份标识。通过物体全域标识，实现数字孪生城市资产数据库的物体快速索引、定位及关联信息加载。目前，主流的物体标识采用 Handle、Ecode、OID 等。

——物联感知技术。物联感知技术分为采集控制、感知数据处理，采集控制技术通过直接与对象绑定或与对象连接的数据采集器、控制器技术，完成对对象的属性数据识别、采集和控制操作。主要包括：传感器、条码、RFID、智能化设备接口、多媒体信息采集、位置信息采集和执行器技术；感知数据处理技术是对感知数据和控

制数据的加工处理技术，制定了覆盖物理链路层、传输网络层及应用层的协议，从而实现感知信息的高效传递。其中物理链路层又包括近场通讯（NFC）、近距离通讯（蓝牙、ZigBee、Z-Wave、UHF 等）和远距离通讯（2G、3G、4G、NB-IoT、LoRa 等）；传输网络层包括 TCP、UDP 协议；应用层包括 MQTT、CoAP、LWM2M、HTTP、FTP、XMPP、ModBus、LoRaWAN 等协议。

——**设备安全防护技术**。设备安全防护包括设备安全加固、设备唯一可信认证、设备通讯加密、设备安全态势感知及设备安全修复等全方位的 IoT 设备安全。设备安全防护技术应适应多种操作系统，如 Android、Linux、RTOS 等，还需要不受各种网络通讯协议（如 LoRa、NB IoT、4G、Wi-Fi）的限制。在设备安全加固方面，针对设备代码进行字符、函数、运行逻辑等多级混淆，防止源代码被逆向，同时提供安全 SDK，保护应用免受越狱系统、软件调试、资源篡改的困扰；在设备可信认证方面，基于证书双向认证为每个设备分配全球唯一的身份标识，使用轻量级算法，减少资源消耗，同时隔离非法终端接入，并在设备通讯传输时采用 SSL 加密，保证设备与边缘设备及云端通讯数据的安全，全程防窃取、防逆向破解、防非法调用。此外，在安全防护的同时，通过检测设备的内存、CPU、进程、系统行为、网络行为等，构建设备安全态势模型，建立安全策略，迅速定位威胁。设备安全修复可以通过 FOTA、热补丁或虚拟补丁等技术低成本对设备漏洞进行修复或网络攻击拦截，保障设备持续运营安全。

3. 通用感知设备

通用感知设备根据感知功能不同，又可分为报警终端、传感终端、控制终端三类，其中，报警终端根据设备感知的数值超过设定

的告警阈值或设备状态发生变化时，能以声光电的方式发出警报；传感终端根据设备设定的感知频率实时采集被测量的数据，并转换为数字信号实现感知数据的监测；控制终端结合报警终端和传感终端采集的数据，接收控制指令并完成控制任务。

通用感知设备除具备以上三种主要功能外，为实现设备状态的实时监测一般会具备心跳功能或设备状态告警功能，如防拆报警、温度过高报警等；同时，为便于设备管理和维护，设备会支持远程参数同步配置功能，以支持上报地址、频率等参数调整及设备复位等管理要求。

随着物联网技术、人工智能技术的发展，通用感知设备也由单模设备向智能 AI 设备和多模多制式综合设备发展。智能 AI 设备是将人工智能的算法嵌入到设备中，使设备本身具有一定的运算和处理能力的设备，目前在智能摄像头领域应用较为广泛，可实现人脸识别比对、违章停车监测、人员密度监测、漂浮物识别、跨店经营、消防通道遗留物监测等智能识别；多模多制式设备是将多种传感器融合汇聚的一个设备里，使设备能满足该场景下多种感知、计算、控制要求。如智慧路灯，以智能灯杆为载体，实现分布式网格化布置，统一感知温度、湿度、光照度、电池电量、噪音、气压、PM2.5、PM10、风速、风向、二氧化碳、一氧化碳、VOC、二氧化硫、二氧化氮、臭氧、车流量、人流量、紫外线强度指数、水深、辐照度、GPS 经度、GPS 纬度等参量。

4. 感知空间布局

在城市快速发展、基础设施和应用方式不断更新，城市人口分布持续变化的背景下，合理有效的实现感知节点部署，是一项重要的课题。不仅要结合自然环境、城市设施等基础要素，还要考虑感

知节点部署的规模、安装的方式以及安全性能等具体的部署要求，以及综合考虑地上（居民区、道路、公共设施）、地下（地下停车场、避难所）、空中等多个维度。上海市、雄安新区等部分省市区已出台了城市物联网终端建设导则，规范了通用感知设备在城市物理空间的感知场景、安装要求、安装数量等，并针对通用感知设备的复杂性、多样性、不规范性，从功能、性能、数据上报、终端与平台交互等方面进行约束，从而促进通用感知设备与城市地理实体有效结合、互为映射，形成数字孪生城市。

当前城市在感知业务领域，处于各自为政、条块分割、烟囱林立、信息孤岛的状态，数字孪生城市将针对这些不同的应用场景，统筹感知体系建设，统一采集汇聚，实现城市动态数据整合与共享，形成全域覆盖、动静结合、三维立体的规范化、智能化、全联接的感知布局，实现物理城市在数字城市的精准映射。

通过规模部署多功能信息杆柱、智能网关和边缘计算节点，采集周围传感器收集到的信息，支持各种近距离及远距离通信协议标准，统一汇聚处理后上传泛在感知与智能设施管理平台 and 城市大数据平台进行管理。

地上：传感器包括温度、湿度、气压、风速、风向、雨量、辐射、能见度等。采用标准气象观测场，或沿道路布设多功能信息杆柱（智能路灯）、铁塔、便携式支架、安防用立杆等感知载体和设施安装地上感知节点；利用智能环卫箱、智能公交牌等固定式载体，利用环境监测车等移动式载体实现车路协同城市内小环境监测；在楼宇建筑中布设排水、燃气、热力、电力、安防、消防等系统的感知节点；在城市能源系统布设自动计量水、电、气、热等能耗的智能仪表。对于土壤温度、土壤湿度、土壤 PH 值等传感器采用数据采

集箱和土壤传感器分离的方式进行安装，数据采集箱放在地上，传感器安装在土壤中。地上感知节点可采用电池+太阳能板方式进行供电。在防雷、防电磁感应、防雷接地网、电涌防护等措施的基础上，依据《地面气象观测规范》等，对感知节点进行规范化的安装。

地下：地下环境包括地下综合管廊、地下交通、地下停车场、地下防务设施、防空洞等，监测要素包括大气环境、气体成分等。在综合管廊、地下交通、地下停车场、地下防务设施、防空设施等地下空间，采用顶棚灯架或地面设置采集箱等方式，或利用水务、燃气、热力、电力、通信地下管线等布设安装感知节点。

空中：可利用浮空平台在空中进行气象、环境等监测和区域视频监控；可利用低空无人机搭载传感器、摄像头等对特殊复杂环境和重点区域进行增强补充、定期巡检和应急保障。

水域：在大型河流湖泊的水下布设水底观测网，水面布置锚泊站，并运用无人监测船等进行水文、生态、环境等监测。

针对不同感知载体和设施特点，传输可采用无线为主或有线为主两种方式进行布局。一是以无线为主，采用 4G/5G 运营商网络、LPWAN、传感器网络、无线专网等进行覆盖，支持低功耗、大连接、位置分散、移动性的感知节点。5G 网络与边缘计算相结合，可实现在网络边缘侧对海量数据进行预处理，再回传给中心云平台，节省传输带宽，提供低时延服务；二是以有线为主，利用搭载物联网关或边缘计算设备的信息集控箱，通过光纤、电缆或短距无线传输方式进行覆盖，支持位置固定、需要持续大带宽连接或持续供电的感知数据采集。

（三）协同计算：高效处理海量数据

1. 需求分析

数字孪生城市下的万物感知互联将产生海量数据，而这些数据不可能全部传送到云计算中心，同时，工业互联网、自动驾驶、视频监控等领域对实时性要求极高，需要在网络边缘处处理数据，因此贴近终端设备的边缘计算成为云计算向边缘侧拓展的新触角。作为大规模整体数据分析的云计算中心，和小规模局部数据轻量处理的边缘计算节点，形成全局化的分布式协同计算形态，为数字孪生城市的精准构建与高效运行提供“算力”支撑。

2. 核心技术

云边协同计算主要通过在网络节点中根据需求统筹部署调度云计算和边缘计算资源，建立虚拟一体化计算资源池，实现从终端到中心的“云-边-端”无缝协同计算。感知终端在采集数据之后，由边缘计算节点进行局部初步处理和快速决策，并将高价值处理数据汇聚到云中心，由云计算做大数据分析挖掘、数据共享开放等处理和分析，优化升级业务规则或算法模型，并下发到边缘侧，由边缘计算基于更新的算法或规则运行计算，更新和升级端侧设备，从而实现完整的自我学习优化的闭环。

随着物联网感知终端规模化建设，将把通用感知设备、边缘计算设备、智能应用等形成逻辑上的不同的边缘管理域，以物联网数据为主，融合少量业务数据，围绕明确的行业 and 任务，通过数据融合、智能算法，达到智能发现、高效管理、便捷服务的要求，做到“全域感知、同数多用，设备协同”。云中心接收通用感知终端、边缘域上报的物联网数据，并汇聚互联网数据、业务数据，结合空间时间数据，更关注城市整体运行的态势以及跨行业、跨区域的业

务和创新。通过端边云协同，使城市全域感知体系满足低时延、高效能的设备协同要求，降低对传输网络的要求，达到就近计算、高效反馈、按需分析的设计目标，城市立体感知体系更丰满。

数字孪生城市驱动边缘计算与 GIS 技术融合。边缘计算与 GIS 技术融合是指将边缘计算的各种特征，用于支撑 GIS 应用的各要素，包括 GIS 内容的发布和分发，GIS 服务的代理和加速，以及在线分析和计算，以一种更加灵活的方式，高效率、低成本地使用地理信息资源。边缘计算与 GIS 技术融合，涉及到几个关键技术：一是边缘前置代理，在 GIS 云中心和客户端之间，对 GIS 服务进行代理加速，提供更好的服务访问体验。二是边缘服务聚合，将不同来源，不同内容的 GIS 服务聚合为一个服务，实现多源、异构地理信息与服务的整合。三是边缘内容分发，GIS 云中心自动将瓦片数据分发到边缘 GIS 节点，实现了边缘 GIS 内容的自动更新。四是边缘分析计算，在边缘端按需进行 GIS 分析和计算，有效提升 GIS 服务性能。

3. 相关产业

国内外 ICT 服务商、电信运营商和行业企业都在积极布局边缘计算市场，形成中心云和边缘云分布式一体化部署。

亚马逊、微软、阿里、华为等 ICT 服务商利用云计算市场先发优势，将云计算能力向边缘侧拓展。如亚马逊推出 AWS IoT Greengrass，可将 AWS 无缝扩展至边缘设备；微软推出 Azure IoT Edge，将 AI 和分析工作负荷迁移到网络边缘；阿里推出物联网边缘计算平台，用户可以将阿里云的边缘计算能力部署在各类计算节点或智能设备中，打造云边端一体化的协同计算体系；华为推出智能边缘平台，支持用户海量边缘节点接入和边缘应用全生命周期管理，提供完整的云边协同一体化的计算解决方案。

中国移动、中国电信、中国联通等电信运营商结合 5G 建设，加快部署 MEC（移动边缘计算）。如中国移动在 10 省近 30 个地市现网开展 MEC 应用试点，并基于 5G 规模试验打造 MEC 商用能力，致力于分场景灵活部署 MEC；中国电信发布了基于分布式开放平台的边缘计算 MEC 平台，支持用户业务下沉、应用本地部署等服务及应用，并通过 MEC 边缘 CDN 的部署，为相关厂商提供边缘 CDN 资源和环境；中国联通推出 Edge-Cloud 平台，在网络边缘侧融合网络、计算、存储、应用、加速资源，并在 15 个省市进行规模试点及试商用建设。

海康威视、超图、树根互联等行业企业基于业务场景需求，加快边缘计算在本行业内应用。如海康威视推出 AICloud 架构，从视频监控边缘域到云中心提供计算池化能力；超图为应对海量空间数据的分析和处理，发布了边缘计算产品 SuperMap iEdge 9D，提供边缘 GIS 能力；树根互联推出根云平台，通过根云 T-Box 车载物联网、根云 Gateway、根云物联代理开放平台、大数据工坊等一系列产品，为各行业企业提供云边协同计算能力。

4. 应用情况

云边协同计算作为“算力”支撑，应用于数字孪生城市各个场景中，如云边协同推动基站白盒化，灵活快速部署 MEC，支撑设备的互联化、自动化、智能化；云边协同推动 CDN 向下一代内容分发网络升级；云边协同助力传统能源产业向能源互联网升级；云边协同推动数字应用实现智能化升级。

——**智能家庭**。用户可以通过网络连接边缘计算节点（家庭网关、智能终端等）对家庭终端进行控制，还可以通过访问云端对海量数据进行访问，实现电器控制、视频监控、定时控制、环境检测、可视对讲等功能。

——**智慧交通**。道路边缘节点集成地图、交通信号、附近移动目标等信息系统，边缘计算可以与云计算配合，将大部分的计算负载整合到道路边缘层，进行实时的信息交互，实现车路协同和自动驾驶。

——**安防监控**。视频监控可以在边缘计算节点（视频探头等）上搭载 AI 模块，面向视频监控、智能安防、人脸识别等业务场景，以大带宽、低时延、快响应等特性实现本地分析、快速处理、实时响应。

——**健康医疗**。用于生命体征监测的可穿戴设备可以在不连接云的情况下本地分析脉搏数据或睡眠模式，实现病人远程健康监测和健康状况即时反馈。同时可以将分析后的数据上传到云端进行 AI 分析，为医生和患者提供病情分析，辅助进行下阶段治疗。

（四）全要素表达：精准“描绘”城市前世今生

1. 需求分析

数字孪生城市建设对建模技术和城市表达模型的表达提出了新要求。传统的城市建设在空间规划上大体都停留在二维平面，远达不到智慧化要求，三维空间的有效感知与实景可视化日益成为城市建设管理的重要抓手，也是数字孪生城市的关键内容。传统三维空间数据模型大都面向特定的专业领域，如地质模型、矿山模型、地表景观模型等，这些模型大部分针对单一数据类型，不能表示多源异构数据，数据和软件的耦合程度很高，重用价值不高，针对地上下和室内外多粒度对象统一表达等难题，需要建立更高水平的城市级三维空间模型。

随着“实景三维中国”的提出和 BIM（Building Information System）如火如荼地开展，城市模型表达进入了第二个阶段：

BIM+GIS 阶段。城市宏观尺度上的对象如建筑、道路等对象，都可以通过实景三维模型来表达，城市微观尺度的对象如门窗、室内对象等通过 BIM 模型来表达，实现初级的数字孪生。特别是自然资源部提出的全国“十四五”基础测绘规划编制工作，其中“实景三维中国”的提出和建设，被业内描述为“一个有着万亿元前景的大市场”。我国各地市实景三维建设将大面积展开。不少行业和地区已先行试水，全国已有北京、上海、广州、深圳、重庆、武汉、南京、嘉兴、成都等地尝试了三维模型或实景三维并获好评。

随着大数据和人工智能的兴起，从城市计算和智能分析的角度来看，现有的三维模型都是非结构化数据：即人眼可见，人脑可识别，但是电脑不可识别。现有的城市信息表达模型只能成为“数据大”，不能称为“大数据”。因此经过语义化技术进行结构提取和属性自动挂接得到的新型城市模型表达 CIM 成为了数字孪生城市的基础核心。一方面 CIM 除了三维视觉表现，还承载了城市要素的属性信息；另一方面，CIM 的几何结构和属性信息均可以被计算机所理解，将城市三维模型从可视化阶段真正引入城市计算领域，实现挖掘、统计、分析、决策，物理城市的数字表达经历了从最初的二维平面、到三维立体、到全要素结构化的发展历程。

2. 核心技术

物理实体的数字孪生体，归根结底就是一个个的模型和模型集合，所以建设数字孪生系统的关键也在于模型表达。模型的建立方式随着数据采集技术而迅速发展，不同来源、不同类型的空间三维数据愈来愈多，目前应用于建筑物、构筑物、道路、地下管线、地质、水体和地表高程属性数据和纹理数据的采集方法，主要有传统三维建模软件、三维激光扫描、航空摄影测量、移动测绘系统等。

随着几何生成技术、语义化技术、多模态多尺度空间数据智能提取技术、深度学习技术、多分辨率空间索引和调度技术、高性能三维渲染等技术的不断发展，促进点云逆向建模、倾斜摄影实景三维重建、结构化语义建模等城市模型表达方式不断成熟，数字孪生城市的三维信息模型进入了高精度、高效率、高真实感和低成本的全自动全要素结构化表达的阶段。

——**多模态多尺度空间数据智能提取技术**。利用性能互补的多模态多尺度遥感数据获取装置，重点突破空地多模态多尺度光学影像自动空三和联合精确定位、密集点云自动匹配、精细三维模型自动纹理采集和映射、激光 LiDAR/全景相机和 IMU 等传感器融合的同步定位和精细地图构建技术、激光点云的语义自动分析及提取、地物与人工建筑及其组件的语义特征识别与语义信息提取等核心关键技术，实现基于无人机/航空倾斜摄影、航空 LiDAR 的大场景真三维精细城市模型自动化构建。

——**语义化技术**。语义化即对数据进行智能化加工处理，使其所包含的信息可以被计算机理解。大数据环境下，只有将数据进行语义化处理之后，才能更快速、准确地提取到所需要的信息，保证数据的无歧义理解和良好结构化表达，实现可量化索引。利用语义化技术，可以形成一个量化并可索引的城市描述信息，同时利用 CIM 的可扩展性，可以接入人口、房屋、公司法人、安防设施、公安警务数据、住户水电燃气信息、交通信息、公共医疗等诸多城市公共系统的信息资源，实现跨系统应用集成、跨部门信息共享，避免重复建设和信息化孤岛。

——**深度学习技术**。利用深度学习技术，自动对实景三维检测、分割、跟踪矢量、挂接属性入库，将物理世界中多源异构和多模态

的空间大数据组织形成复杂庞大的数据语义网络，解决跨领域的数据在几何位置、属性语义、逻辑等方面的相似性、不一致性问题；并结合天-空-地一体化多源三维数据融合和可视化技术，实现静态三维可视化向智能动态可视化转变；CIM 还可建立从描述性可视分析到解释性可视分析和探索性可视分析的多层次可视分析体系，快速有效地从多模态实景三维大数据中发掘价值，支撑数字孪生各应用领域的决策分析。

——**三维渲染技术**。硬件方面主要是 GPU 实时渲染技术，软件方面主要有 RTC 流计算、多视频 3D 融合、基于深度学习的超分辨，以及实时光线追踪技术。主流技术 GPU 采用 Nivida 体系，上层驱动 directX 或 OpenGL，各家公司自研引擎，应用于智慧城市以及游戏、医疗等各领域。利用 WebGL\VR\AR\MR\全息投影技术等，可提高对城市地理环境的真实化表达，给人们提供沉浸式体验。WebGL 通过提供硬件三维加速渲染能力，实现利用显卡在浏览器里展示 3D 场景和模型，支持空间地理数据的可视化表达，可轻松应对复杂 3D 数据的渲染。VR 技术使用户沉浸其中，模拟环境的真实性与现实世界难辨真假，具有较强的人机交互能力。AR 技术将虚拟信息与真实世界相互叠加补充，从而实现对真实世界的“增强”。MR 技术通过全息图，将现实环境与虚拟环境相互混合，即在新的可视化环境里物理和数字对象共存，并实时互动。全息投影技术利用干涉和衍射原理记录并再现物体真实的三维图像的技术，实现虚拟影像跃然于眼前，栩栩如生，令人难辨虚实，视觉效果强烈。

3. 相关产业

随着数字孪生城市兴起，目前在城市全要素建模领域也涌现出一批创新能力强、业务产品突出的企业，从自动参数化建模，到实

景三维建模，再到语义化建模都有不俗表现的代表性产品。

自动参数化建模表达。51VR 公司基于自动化建模技术实现数字孪生城市还原，通过静态时空数据和动态天气、光照等物理仿真，约 6 小时即可实时渲染构建数千平方公里的 L2 级别数字孪生城市，实例如下：





图9 L1-L5 场景渲染标准

实景三维模型表达。由超图公司牵头起草，自然资源部信息中心、国家基础地理信息中心等 12 家单位参与起草的《空间三维模型数据格式》团体标准日前正式发布。该标准定义了一种开放式可扩展的三维地理空间数据格式——Spatial 3D Model (S3M)，对倾斜摄影模型、人工建模数据、BIM、点云、三维管线、二维/三维点线面等各类数据进行整合，适用于海量、多源异构三维地理空间数据和 Web 环境下的传输与解析，也为不同终端、不同应用系统间的三

维数据共享和互操作提供开放、标准、通用的数据格式基础，兼容多种软硬件环境，鼎立支撑实景三维中国和数字孪生城市建设。

语义化建模表达。泰瑞数创目前已经具有从三维语义建模到语义模型管理到语义模型应用的全流程的技术方案，并已参与到上海公安、天津滨海城市大脑、上海临港城市大脑等智慧城市建设中。语义模型组织采用 OGC 标准的 CityGML 数据组织方式和模型格式，它定义了城市中的大部分地理对象的分类及其之间的关系，而且充分地考虑了区域模型的几何、拓扑、语义、外观属性等。其中包括了主题分类之间的层次、聚合、对象之间的关系、空间属性等。这些专题信息不仅仅是一种图形交换格式，而且允许将城市三维模型部署到各种不同应用中的复杂分析任务，例如仿真分析、城市数据挖掘等。CIM 生产效率可以达到每小时自动提取至少 3000 栋单体语义模型；并且自动提取屋脊高度、屋顶方向等几十种空间结构信息。同时，也可通过深度学习技术根据 CAD 或非数字化图纸自动化生成室内三维语义模型。



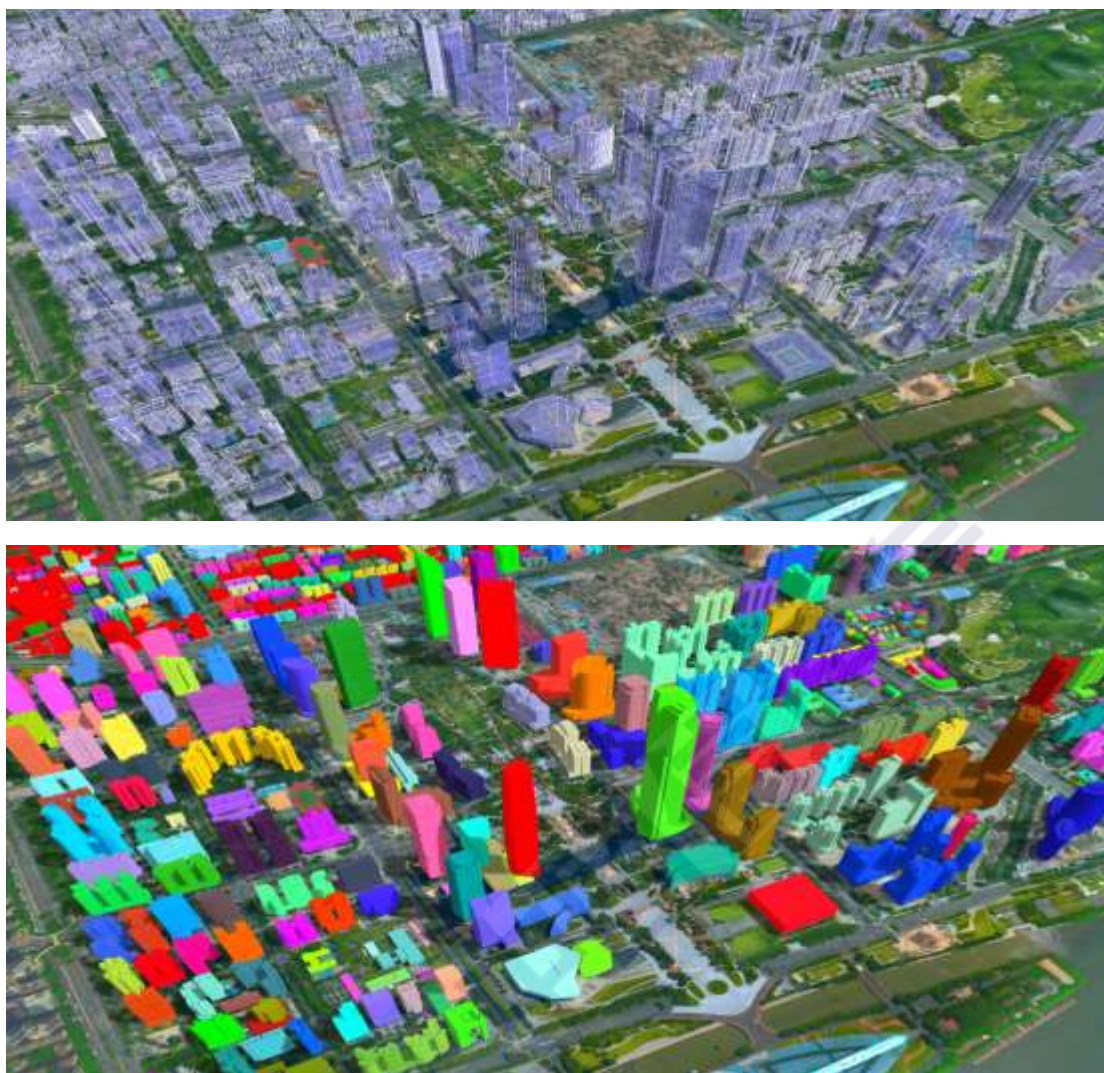


图 10 城市语义化建模表达

在可视化渲染上，从底层的 GPU 芯片，到上层图形驱动，渲染引擎和开发工具等，基本都掌握在欧美国家手中。国内目前做的应用，都是在应用层来做，并且大多引擎也是西方的开源引擎。高水平学者很多，但在软件系统应用，产品化上有明显不足，还有很长的路要走。不过，近年来我们可以看到：一方面以 SmartEarth VizDeck 为代表的国内二三维地理信息引擎通过 GPU shader 渲染和 Streaming 机制，实现城市海量空间数据的快速渲染及可视化调度，提升可视化渲染效率；另一方面以 51VR 为代表的国内虚拟现实引擎科技公司已通过自研云渲染 PaaS 架构、实时渲染与物理仿真技术，提升可视化渲染效果；同时还有以阿里 DataV 为代表的大数据可视

化渲染引擎，基于 WebGL 技术实现城市大数据渲染，提供低成本可复用的数据可视化方案。这些都在逐渐缩短国内与国外的差距。

4. 应用情况

来自政府部门的城市管理需求仍然占据主导地位，包括在规划、交通、公安、应急、消防、水务、能源等领域对实景三维数据的应用。与此同时，三维建模应用也向着建筑工程、生态环保、文化遗产、景区服务、园区和社区信息化管理等新市场方向广泛渗透，市场需求强烈。

(1) 城市规划领域：精确反映整个城市的建筑物分布情况以及城市地形，促进有关部门和人员作出科学的城市规划决策，以及城市重点区域动态监测、违建取证与执法等，推动城市健康发展。

(2) 建筑工程领域：在设计阶段，帮助设计师分析待建区域周边建筑以及地形信息，将设计好的建筑模型置入场景中，进行日照分析、风能分析等；在建筑施工阶段，可准确反应施工进度，为施工管理做出决策；在建筑运营与管理阶段，辅助决策建筑物维护与装修。

(3) 旅游领域：三维实景模型可 1:1 还原景区模型，有助于景区展示、景区数字化宣传，结合 VR 技术更可制作在线景区游览程序，让旅客足不出户即可观赏景区风景。

(五) 模拟仿真：在数字世界推演城市运行态势

1. 需求分析

在数字城市仿真，在物理城市执行，使城市建设和发展少走弯路、不留遗憾，是数字孪生城市价值的真正体现。在数字孪生城市中，运用模拟仿真技术，可进行自然现象的仿真、物理力学规律的仿真、人群活动的仿真，自然灾害的仿真等，为城市规划、管理、

应急救援等制定科学决策，促进城市资源公平和快速调配，支撑建立更加高效智能的城市现代化治理体系。

2. 核心技术

目前利用计算机进行模拟仿真的主要技术包括有限元分析、计算流体力学和多物理场耦合仿真等。

有限元分析（FEA, Finite Element Analysis）利用数学近似的方法对真实物理系统（几何和载荷工况）进行模拟，通过简单而又相互作用的元素（即单元），就可以用有限数量的未知量去逼近无限未知量的真实系统。有限元分析方法已经应用于航空航天、核能、机械、土木、水利、地震、物探、气象、渗流、水声、力学、物理学等几乎所有的科学研究和工程技术领域，主流的有限元分析软件有 ABAQUS、ANSYS、MSC 等。

计算流体力学（CFD, Computational Fluid Dynamics）通过计算机和数值方法来求解流体力学的控制方程，对流体力学问题进行模拟和分析。目前 CFD 除了应用于传统的流体力学工程领域，如航空航天、气象、水利、船舶等，应用范围还在不断扩大，在建筑、环境、化工等领域也被广泛应用。

多物理场耦合仿真可对现实工程中温度场、应力场、湿度场等多个物理场之间的相互作用进行仿真分析，仿真结果更接近现实。瑞典多物理场仿真软件公司 COMSOL 是该领域的佼佼者，其推出的多物理场复杂耦合仿真软件具备超过 30 个专业领域的附加模块，已在多个领域广泛应用。

仿真技术正向网络化、虚拟化、智能化、协同化方向发展，基于面向对象的仿真技术、智能仿真技术、分布交互仿真技术、虚拟现实仿真技术等是仿真技术发展的主要趋势。

面向对象仿真是将面向对象的方法应用到计算机仿真领域中，以产生面向对象的仿真系统，该方法从人类认识世界模式出发，使问题空间和求解空间相一致，提供了更自然直观，且具可维护性和可重用性的系统仿真框架。

智能仿真是以知识为核心和人类思维行为作背景的智能技术，引入整个建模与仿真过程，构造智能仿真平台。智能仿真技术的开发途径是人工智能与仿真技术的集成化。

分布交互仿真是通过计算机网络将分散在各地的仿真设备互连，构成时间与空间互相耦合的虚拟仿真环境，可以在逼真的视景和操作模拟环境中，进行人机交互度很高的仿真实验和演练。

虚拟现实仿真技术是现代仿真技术的一个重要研究领域，是在综合仿真技术、计算机图形技术、传感技术等多种学科技术的基础之上发展起来的，其核心是建模与仿真，通过建立模型，对人、物、环境及其相互关系进行本质的描述，并在计算机上实现。

3. 相关产业

就目前的发展阶段来看，对整个城市进行模拟仿真的软件产品还未出现，仿真软件的应用范围还是局限于部分细分领域，如用于交通仿真的 SUMO、VISSIM、Carsim，水动力仿真的 MIKE21、HEC、SWIMM，景观环境仿真的 SITES 平台和物流固废仿真的 Anylogic。国内仿真软件与国外相比还有较大差距，国外厂商掌握 CAE 有限元算法和 CAD 核心几何内核算法，国内企业只能通过授权经营方式使用国外几何内核，基本不具有自主知识产权，多数厂商主要基于国外产品进行二次开发。

随着国内仿真软件的快速发展，在交通等部分领域已形成一定优势。**51VR 公司**自主研发推出 51Sim-One 无人驾驶仿真平台，通过

自主研发的静态高精度场景数据编辑和自动化转换工具，既可对已采集场景的多种数据进行融合，将实体非结构化场景快速生成高拟真的结构化虚拟仿真场景，又可根据自动驾驶测试任务的需要从无到有构建仿真训练流程与评价体系，极大提升自动驾驶训练效率。

百度公司 2017 年对外发布了 Apollo（阿波罗）平台，其中的仿真平台可以提供贯穿自动驾驶研发迭代过程的完整解决方案，仿真服务拥有大量的实际路况及自动驾驶场景数据，基于大规模云端计算容量，打造日行百万公里的虚拟运行能力。**中视典数字科技公司**依托自主知识产权的虚拟现实平台软件，专门针对数字城市完全自主研发出产品：数字城市仿真平台（VRP-Digicity）、三维网络平台（VRPIE）、三维仿真系统开发包（VRP-SDK）等，能满足不同数字城市规划管理领域，不同层次客户对数字仿真的需求。

4. 应用模式

目前模拟仿真技术在智慧城市建设方面的应用主要包括以下几个方面。

（1）城市应急仿真与管理。通过对台风等紧急自然灾害，或恐怖袭击等治安事件在虚拟现实场景中逼真还原，有利于一线人员沉浸式投入训练，提高其救援能力，也有利于实现多部门间的跨地域联合演练，同时达到优化和验证应急策略的目的。

（2）城市虚拟现实漫游。在城市虚拟现实场景中，体验者可从任意角度、距离观察场景中的建筑，也可以选择多种运动模式如行走、飞行、驾驶等，并自由控制浏览路线以感受建筑与道路的布局情况，同时也可以感受每一栋建筑的采光情况。漫游过程中，可观察现有设计方案对已有周边建筑的影响情况，如颜色是否协调、高度是否阻挡采光等问题，并可实时切换规划方案，直观地感受多种环境方

案，做出客观且全面的对比。

(3) 建筑设计虚拟仿真。实现建筑虚拟仿真与实时可视化效果。通过简单改变建筑高度、外立面材质或颜色、绿化面积、楼宇间距、光照状况等，即可在虚拟现实，以任意角度实时地查看建筑的多套设计方案。

(4) 交通系统虚拟仿真。在虚拟城市中，建立包括航空、铁路、隧道、桥梁、车辆等的交通系统仿真。使人、车、路之间的关系以更先进的方式呈现，从而实现高效安全的绿色城市交通体系，协助解决拥堵、事故、交通污染等困扰。

(5) 可视化城市能源管理。实现现实中难以达到的城市能源系统可视化仿真场景。包括液化天然气、暖气、新兴太阳能设施、给排水系统、污水处理、城市照明等仿真与规划。

(六) 深度学习：推动城市自我学习智慧成长

1. 需求分析

数字孪生城市对人工智能领域深度学习、自我优化技术的应用，可使城市从以往部门之间各自为战、治标不治本、被动迟缓的基层治理模式，转变为全域协同治理、问题智能响应、需求提前预判的模式，构建起高效智慧的城市运行规则。在数字孪生城市中，对深度学习技术的应用主要集中在海量数据处理、系统运行优化等方面。

一是海量数据亟需结构化处理。数字孪生城市中的海量视频、音频、图像、文字等数据包含了大量非结构化信息，而上层应用平台需要调用处理的是机器可以理解的结构化信息。深度学习可从原始数据中将信息挖掘出来并进行结构化保存，并通过各种分析模型衍生新的数据，以满足各类系统平台的调用需求。

二是系统运行需自我迭代优化。现实物理城市千城千面、场景

复杂、变化迅速，数字孪生城市需要持续进行自我优化、更新迭代，才能快速响应不断发展中的物理世界。利用人工智能深度学习、自我优化的能力，可提升智能算法执行的效率和性能，适应快速变化的城市服务场景。

2. 核心技术

深度学习核心应用技术包括计算机视觉、自然语言处理、生物特征识别、知识图谱等，其中前三者主要用以从已有城市数据中挖掘出新的数据并结构化当前数据，知识图谱则将数据与数据联系起来以形成决策的基础模型。近年来，深度学习算法层出不穷，进一步满足数字孪生城市的实际应用需求，自动机器学习则推动系统不断自优化，实现数字孪生城市内生迭代发展。

计算机视觉。计算机视觉是使用计算机模仿人类视觉系统的科学，让计算机拥有类似人类提取、处理、理解和分析图像以及图像序列的能力。自动驾驶、机器人、智能医疗等领域均需要通过计算机视觉技术从视觉信号中提取并处理信息。近年来预处理、特征提取与算法处理渐渐融合。根据解决的问题，计算机视觉可分为计算成像学、图像理解、三维视觉、动态视觉和视频编解码五大类。

自然语言处理。自然语言处理是实现人与计算机之间用自然语言进行有效通信的方法，主要包括机器的翻译、阅读理解、问答系统、文章摘要提取、命名体识别等。在数字孪生城市中，通过将计算机视觉与自然语言处理技术相结合，可构造更复杂的应用，赋予系统看图说话、视频摘要等能力。

生物特征识别。生物特征识别可通过人体独特的生理特征、行为特征进行识别认证。人类的生理特征包括指纹、掌纹、虹膜、声纹、指静脉等，行为特征包括步态、击键习惯等。在数字孪生城市

中，生物特征识别可广泛应用于服务领域和安全领域，如结合智能视频监控进行嫌疑犯检索，协助公安机关快速破案。

知识图谱。知识图谱本质上是结构化的语义知识库，为智能系统提供从“关系”角度分析问题的能力。以符号形式描述物理世界中的概念及其相互关系，其基本组成单位是“实体—关系—实体”三元组，以及实体及其相关“属性—值”对。不同实体之间通过关系相互联结，构成网状的知识结构。知识图谱能够依托数字孪生城市的海量信息为海量实体建立各种各样的关系，为城市运行管理奠定基础。例如运用知识图谱开展反洗钱或电信诈骗，通过对交易轨迹的精准追踪和关联分析，获取可疑人员、账户、商户等信息。

深度学习算法。胶囊网络、迁移学习、联合学习等算法理论陆续被提出，一定程度上弥补了卷积神经网络、堆栈自编码网络等经典算法的缺陷，使人工智能在数字孪生城市的应用进一步拓展。胶囊网络能同时处理多个不同目标的多种空间变换，保留位置、大小、方向、变形、速度、色相、纹理等信息，图像识别能力更佳，适用于处理城市道路车辆、行人等快速变化的视频图像数据。迁移学习可利用数据、任务或模型之间的相似性，将学习过的模型应用于新领域的一类算法，有助于数字孪生城市获得更快的决策效率。联合学习可通过参数共享和标注策略从多个数据源获取数据进行学习并保护敏感数据，例如在医疗健康领域，利用联合学习可从不同医院获取医疗数据用以训练模型，而无需担忧患者敏感数据泄露，更好地满足了数据安全保障需求。

自动机器学习。自动机器学习可使模型自动习得合适的参数和配置，选择最优算法，使人工智能系统更加完备。经典的自动机器学习方法包括超参数优化、元学习、神经网络架构搜索、自动化特

征工程等，目前已有 AutoML、Auto-Keras、TPOT、H2OAutoML、Python AutoML 等开源的自动机器学习工具面世。自动机器学习可以帮助数字孪生城市智能系统免除手动调整算法的麻烦，自动体察城市运行规律，推动系统自优化，实现内生迭代发展，从而成为能够适应城市复杂多变现实场景的自主智能系统，实现城市的智慧决策和高效运行。

3. 相关产业

深度学习模型和技术源流多来自西方人工智能科学家，随着人工智能理论和技术日益成熟，应用范围不断扩大，人工智能产业正在逐步形成、不断丰富，相应的商业模式也在持续演进和多元化。我国多数人工智能企业缺少原创算法，但近年来科研实力大幅增长，2017 年我国 AI 论文在全球占比达 26.63%，青年学者在视觉领域、NLP 领域顶级学术会议上逐渐占据更多席位。我国深度学习领域的差距主要在于缺乏体系化的产品、生态，未能进一步沉淀市场应用。

目前，数字孪生城市中较为成熟的深度学习产品目前有泰瑞数创 CIM Generator 空间语义平台和商汤科技 SenseEarth 平台。前者是一款融合了深度语义信息的 AI PAAS 平台，它包含了一个强大的人工智能内核，可将各类数据自动解译生成城市语义模型。同时支持多数据源，包括遥感影像、航空影像、激光点云、建筑图纸等数据输入，并内置插件式 AI 组件，包括深度学习算法框架，内插多组网络模型，支持分布式架构。SenseEarth 智能遥感影像解译平台是一款面向公众公开的遥感影像浏览及解译在线工具，具有强大的数据解析和洞察能力，可提供在线体验基于卫星影像的道路提取、舰船检测、土地利用分类等人工智能解译功能，并可支撑用户浏览历史影像，以月度为单位对不同时段的影像进行变化检测，快速感知

城市的变迁与发展。

4. 应用情况

深度学习的发展经历了技术驱动和数据驱动阶段，现已进入场景驱动阶段，深入落地到实际需求之中，解决不同场景的问题。

(1) 智能安防。随着“平安城市”“雪亮工程”“智慧社区”等智慧城市安防项目的深入开展，我国各地基本已完成城市视频监控的布设。城市里成千上万路监控摄像头或传感器昼夜不停地监视、采集数据，向监控管理平台推送的待处理音视频数据堪称海量。受制于肉眼识别劳动强度与精准度极限，不依靠计算机自动进行数据筛选，必然造成信息处理迟缓、漏判错判，贻误战机。通过深度学习推动视频结构化，可对视频中的人、车、物等活动目标进行特征属性自动提取并形成文本信息，帮助系统在数据库中快速查找到关键的人、车、物等相关音视频线索。

(2) 智能交通。目前，我国智能交通系统的应用主要是通过对交通中的车辆流量、行车速度进行采集和分析，对交通进行实施监控和调度，有效提高通行能力、简化交通管理、降低环境污染等。结合深度学习算法，系统可预测城市各区块的车流、人流情况，提前进行管控分流，以缓解交通拥堵、避免踩踏事件发生。在航空领域，则可通过对机场航班起落历史数据的深度学习，实现航班起落时间预测。

(3) 环境监测。生态环境监测是生态环境保护的基础工作，也是推进生态环境建设、开展环境气象预测的重要支撑。我国环境监测网络日渐完善，积累了海量的气象气候、空气、水体、土壤、自然灾害、污染排放等历史数据。深度学习可利用环境数据，充分挖掘各类环境数据之间的内在关联，帮助人类更好认识复杂的生态环

境系统，并提升气象预测精准度。例如，基于空气质量数据、气象数据和天气预报数据，深度学习模型可以预测更细粒度的空气质量，支撑政府精准施策，帮助市民规划出行方案。

（4）市政管理。市政管理工作与市民生活环境密切相关，市政管理水平是城市管理水平的直观体现。然而市政设施规模庞大、所处环境复杂，随着我国城市化发展进程不断发展，市政管理工作难度与日俱增。通过将结构化数据与深度学习算法结合，市政设施管理可变被动维护为预测性维护。例如，自来水因受管道使用年限、地理位置、气象环境、市民用水模式等因素影响，水质判断难度颇高。利用以上各类数据构建深度学习模型，可精准预测管网水质，指导自来水厂科学投氯消毒，还可判断水管健康状态，第一时间进行维护、修理。

四、数字孪生城市典型应用场景

（一）城市规划仿真：形成全局最优决策

对于城市规划而言，通过在城市信息模型上模拟仿真“假设”分析和虚拟规划，推动城市规划有的放矢提前布局。在规划前期和建设早期了解城市特性、评估规划影响，避免在不切实际的规划设计上浪费时间，防止在验证阶段重新进行设计，以更少的成本和更快的速度推动创新技术支持的各种规划方案落地。通过城市信息模型以及可视化系统，以定量与定性方式，进行专题分析、模拟仿真、动态评估、深度学习规划方案以及对城市带来的影响，保证规划楼宇、绿地、公路、桥梁、公共设施等每一寸土地时，综合效益实现最优化。

基于多源数据和多规融合实现规划管控一张图。整合所有基础空间数据（城市现状三维实景、地形地貌、地质等）、现状数据（人

口、土地、房屋、交通、产业等)、规划成果(总规、控规、专项、城市设计、限建要素等)、地下空间数据(地下空间、管廊等)等城市规划相关信息资源,形成内容完善、结构合理、规范高效的现状、规划数据统一服务体系,在数字孪生空间实现合并叠加,解决潜在冲突差异,统一空间边界控制,形成规划管控的“一张蓝图”,以此为基础进行规划评估、多方协同、动态优化与实施监督。在保证“一张蓝图”实时性和有效性的前提下,通过对各种规划方案及结果进行模拟仿真及可视化展示,实现方案的优化和比选。

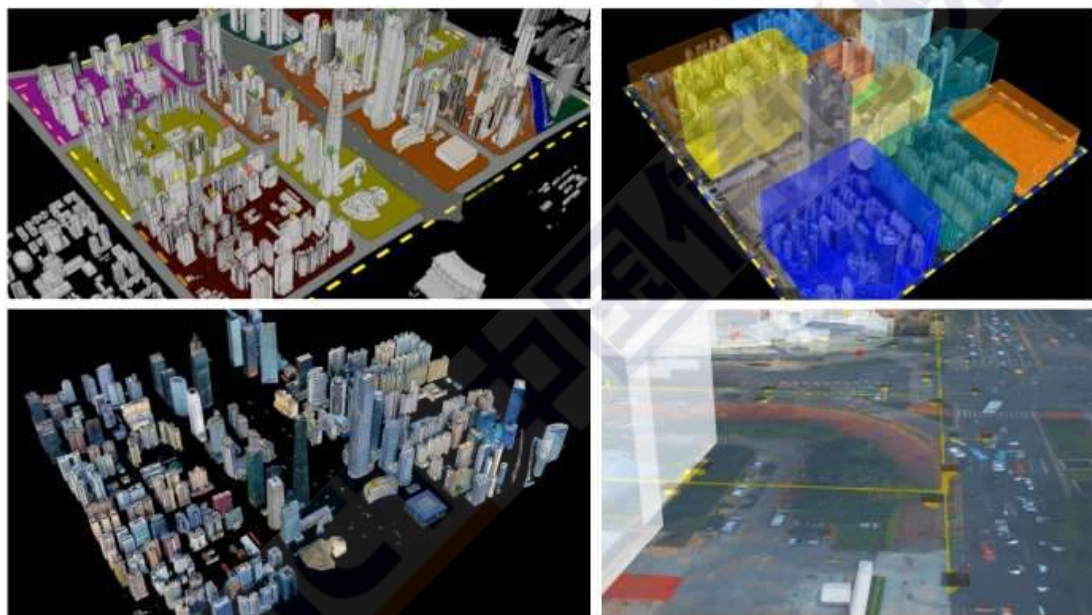


图 11 规范管控一张图

基于全量数据分析进行多方案比选。通过建立城市信息模型平台,汇聚更多规划相关数据,如静态信息有人口分布密度、绿地面积布局、地理空间位置、房屋布局、道路分布、停车位等信息,动态信息有交通流量、实时环境检测、空气流动、温度变化、人们社交活动等信息。基于全量数据构建各类模型,如城市风貌模型、控规模型、参数化模型等,实现用地统计、管线统计、面积汇总、拆迁分析等功能,采用 GIS 方式进行展示,如温度变化、水势变化、空气动力变化、雾霾分布情况等,为规划提供决策依据。对城市规

划规模、能源系统、通信系统、医疗资源、教育资源、防灾能力、绿地景观、供水及污水处理、文化健身场地建设等方面提供专题分析，支持进行多方案评价对比。建立城市规划评价指标，包括用地、绿化、人口分布、空间结构等，支持指标计算与综合评价和多方案评价对比。



图 12 城市风貌建模

基于城市体检进行规划修正。利用城市信息模型属性信息机器可识别可分析的特性，对城市运行数据进行可视化分析，从城市环境监测反馈、城市建设监测反馈和城市运营监测反馈三个层面进行城市体检，在数字空间分别展示城市生态环境动态（水、大气等）、城市建设管理情况（土地利用、违建执法等）和城市运营（人口、交通、产业等）情况，并分析梳理相关问题，归纳总结规划意图实现程度和缺陷。通过城市体检对照规划目标和规划实施情况，进行规划设定指标的评价、规划实施质量的评价和规划预期的合理性评价，并提出修正目标，如改进规划设计方案以及调整建设时序。

（二）城市建设管理：项目进度可视化管控

城市建设项目具有规模大、复杂度高、周期长、涉及面广等特

点，项目管理十分困难，整个项目的进度和质量难以科学管控。利用数字孪生技术，不仅可以全要素真实还原复杂多样的施工环境，进行交互设计、模拟施工，还可赋予城市“一砖一瓦”以数据属性，确保信息模型在城市建设全生命周期不同阶段的信息交换。

设计阶段——交互设计。在城市建设项目的设计阶段，利用数字孪生技术，构建还原设计方案周边环境，一方面可以在可视化化的环境中交互设计，另一方面可以充分考虑设计方案和已有环境的相互影响因子，让原来到施工阶段才能暴露出来的缺陷提前暴露在虚拟设计过程中，方便设计人员及时针对这些缺陷进行优化。同时还可以对施工量提供辅助参考。

案例 基于数字孪生的铁路选线设计

中铁勘察设计院集团有限公司设计了一套在数字孪生环境中为铁路设计选线选址的工具。不用于以往作业人员埋头苦画的场景，用户只需通过鼠标在数字孪生场景中一点，即可以开始线路初步走向设计：首先得到一条没有坡度的线路，然后系统会自动拉坡设计，形成一组默认变坡点，直接生成线路轨面模型。自动拉坡后还会同时自动生成拉坡方案的各项数据评估报告。通过“由粗入精”的选线模式，方便地实现从宏观到微观的逐步细化选线。同时还利用 VR/AR 设备，在数字孪生模拟环境中，进行交互设计、巡查现场叠加线路模型等直观验证、审查及分析。



图 13 铁路选线设计



图 14 VR/AR 交互

施工阶段——全面管控。在施工阶段，可以利用数字孪生技术中对象具有的时空特性，将施工方案和计划进行模拟，分析进度计划的合理性，对施工过程进行全面管控。例如可以事先模拟大型设备吊装方案，在实景三维虚拟环境下检查项目设计和施工能力，通过动态碰撞分析检测物体运动过程中可能潜在的碰撞。



图 15 工程模拟与施工现场

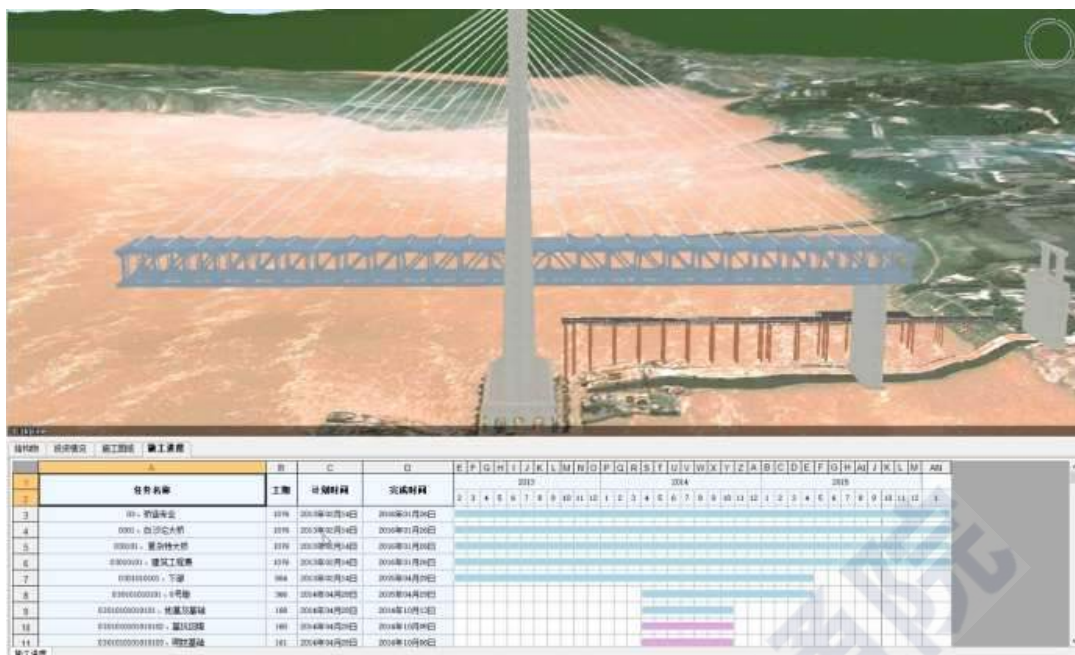


图 16 施工进度管控场景

案例 铁三院数字孪生施工模拟，助力阳大铁路科学施工

在阳大铁路施工过程中，利用数字孪生技术体系，构建了施工线路两侧的高分辨率实景三维场景，包括地形、道路、植被等要素均被一一还原，真实再现施工作业环境。施工前可以先在数字孪生环境中进行多套方案进行施工模拟、对比，最终选取最优施工方案，进行施工。真实全要素的数字孪生环境，可以让传统方法中到施工阶段才能暴露出来的缺陷提前暴露在虚拟建造过程中，方便管理人员及时针对这些缺陷进行优化调整，从而确保项目如期完工。



图 17 模拟施工场景

运维阶段——数据留存。项目建设完成进入运营维护，其设计、施工数据将全面留存并导入同步建成的数字孪生城市，构建时空数据库，可实时呈现建成物细节，并基于虚拟控制现实，实现远程调控和远程维护。建筑工程项目完成后，设计、施工、装配过程中的所有数据全部留存，生成完整的建筑三维模型，通过在建筑内外部空间部署各类传感器、监控设备，采集建筑环境数据、设备运行数据、构件压力和应变数据、视频监控数据、异常报警数据等并进行智能分析，对可能出现的建筑寿命、设备健康等问题进行预测预警。当出现问题隐患和故障报警时，管理人员可借助 VR/AR 设备操控智能巡检机器人进行巡查和维护，在虚拟空间中诊断和解决物理建筑中存在的实际问题。



图 18 基于数字孪生的建筑运维管理

（三）城市常态管理：“一盘棋”综合治理

数字孪生城市立足城市运行监测、管理、处理、决策等要求，将各行业数据进行有机整合，实时展示城市运行全貌，形成精准监测、主动发现、智能处置的城市“一盘棋”治理体系。

城市运行“一张图”管理。利用城市信息模型和叠加在模型上

案例 天津滨海数字孪生城市运营中心, 一盘棋综合治理

天津滨海城市运营中心, 运用泰瑞数创数字孪生平台, 打造城市交通、安监、规划等常态业务一张图, 实现城市运行状态的动态实时感知, 实现城市治理由政务服务、产业发展、民生服务、城市管理等经济社会发展评价指标体系, 基于数据资源平台, 整合功能区各个领域的运行数据, 动态监控城市运行状态, 实现全面、直观的感知城市运营管理状况; 最终实现可视化、科学化、智能化城市综合治理。



图 20 数字孪生城市运营中心

城市部件统一数字化管理。城市部件管理。城市部件管理一直是城市治理的重点和难点。一方面, 随着城市的智慧化发展, 各类城市部件数量呈现爆发式增长态势, 管理复杂度不断上升, 另一方面, 城市部件广泛部署在地上、地下、水中、建筑物内外等各个角落, 空间位置复杂, 故障损坏具有突发性和随机性, 而传统的城市部件管理手段和方式较为单一, 存在信息表述不清晰、传达不准确、处理流程慢等问题。在数字孪生城市中, 基于标准统一的城市部件数字编码标识体系和空天地全方位立体部署的物联感知设施, 能够为各类城市部件、基础设施甚至是动植物等生命体赋予独一无二的“数字身份证”, 实现对城市部件的智能感知、精准定位、故障发现

和远程处置。

案例 无人机城市巡逻，全视角城市管理

临港城市大脑，有机融合地面语义化单体建筑、一千多个摄像头、传感器及智能算法，实现通过 AI 技术辅助城市治理。采用无人机进行日常路线巡航飞行，进行城市管理，并打造 5 分钟出勤圈，日飞行里程超过 100 公里，巡查发现率提高到 1 分钟。其中 80% 以上的城市管理事件应对采取智能派单，准确率超 90%。必要时可在滞留游客头顶绕飞、实时喊话，紧急情况下还可直接报警。城市精细化管理主动发现率提高到了 70%、智能派单率超过 90%，案件发现时间从 1 天缩短到了 1 分钟，复杂案件信息员派单时间从 30 分钟缩短到了 5 分钟。

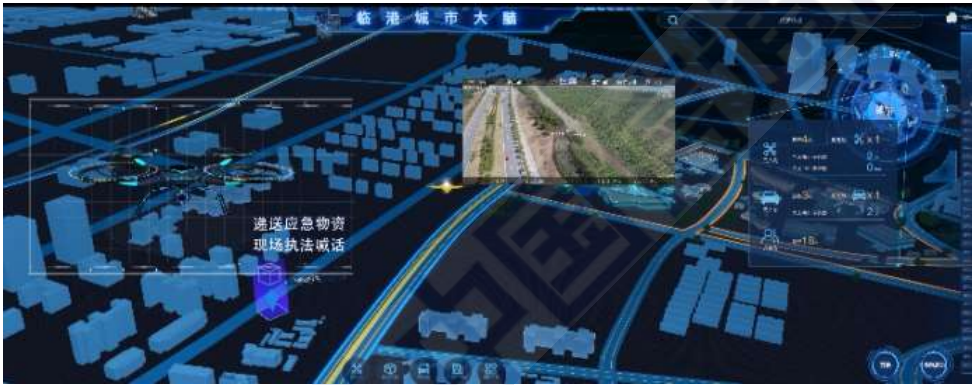


图 21 无人机现场执法喊话

(四) 交通信号仿真：最大化道路通行效能

通过将物理世界中复杂的交通系统，使用云计算、物联网、人工智能、大数据、实景三维、语义化等技术进行复制，构建可被机器理解的数字孪生交通环境，融合多源/异构/多模态交通实时数据，构建交通信息知识图谱，对交通时空大数据进行展示、挖掘、分析，从而实现对交通的监测预警、应急处理，以及拥堵治理、联程联运等功能。

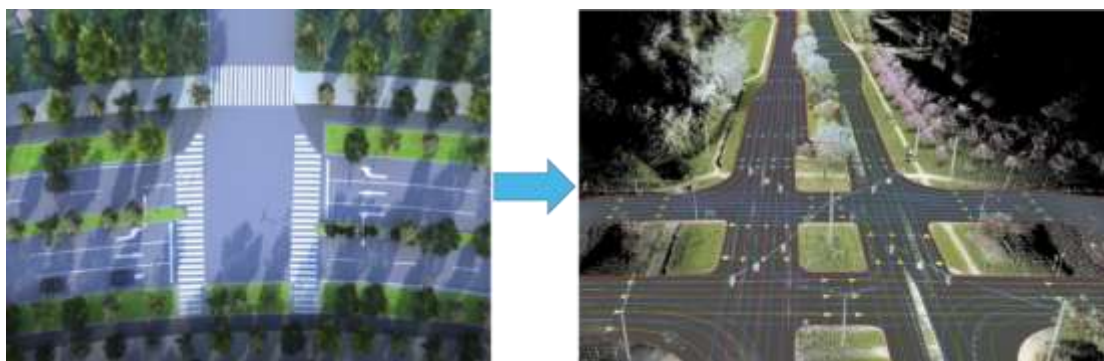


图 22 数字孪生交通路网

优化城市交通。通过数字孪生交通环境，可自动计算城市道路网密度、干线网密度、人均道路面积、非直线系数、时间可达性、空间可达性等多项指标，对路网进行分区、分段、总体的空间拓扑评价。基于交通流量数据或者起止点数据，利用交通流理论计算路阻函数、道路路况、交通密度等信息，也可以基于微观仿真将流量转化为宏观参数输入，输出交通运行的仿真结果，对运行效率、路网负荷度等进行分析评价。从公交线网密度、公交专用道比率、信号优先交叉口比率等方面进行公交线网静态评价；结合排班信息、公交客流需求信息，进行公交客流分配计算或者微观仿真，获取客运量，满载率，高峰平均运营速度等结果，对公交动态运行进行评价，实现对城市地面公交系统专项评价。





图 23 数字孪生优化交通

保障交通安全。在很多国家，因为“航路和扇区设计”的不合理、空中交通管理自动化系统设施的不完善等原因，导致局部空域飞机较多，这为空难事故的发生埋下了隐患。新疆空管打造的数字孪生之空中交通管理，创造性的将空中交通管理的各要素如空域范围、空中流量、雷达扇区、航路区间、飞行设备、地勤设备等进行数字镜像制作，集成到一个视图下，为运行管理中心、飞行服务中心、飞行管制中心、设备监控中心提供了更加便捷直观的管理手段，提高了各中心工作人员的管理水平和效率，实现了“保证安全第一、改善服务工作、争取飞行正常”。





图 24 数字孪生之空中交通管理

高精度实景重现，数字孪生加速智能驾驶落地普及。数字孪生具备完整的工具链仿真系统，能够实现道路、地形、交通标志、光线、天气、交通流等的高精度仿真。利用高度逼真、场景丰富的仿真平台，基于真实道路数据、智能模型数据和案例场景数据对自动驾驶车辆进行测试和训练，能够提升智能驾驶的决策执行力和安全稳定性，加速无人驾驶更加安全地落地推广和普及。

案例 高度自动化仿真系统，推动自动驾驶落地

51VR 发挥自身仿真技术优势，开发了端到端的完整工具链仿真系统，搭建了超拟真、大场景、可视化的自动驾驶仿真平台。在静态仿真方面，通过高精地图测绘数据，高度自动化“复制”现实世界。同时，针对目前行业仿真软件的功能不足，在已有 51Sim-One 系统中重构上海市嘉定区汽车城的城区道路，并且增加了光线和天气变化功能，达到重现真实路况的效果。在动态仿真方面，通过 AI 驾驶员模型、交通流模型、实际驾驶员案例库、交通案例还原、手动设置交通状况等五种渠道“生产”虚拟交通中的动态互动关系，保证测试场景的丰富度与多样性。公司通过打造自动驾驶仿真平台，开展全场景模拟验证工作，探索自动驾驶的深度验证与检测，加速自动驾驶更安全地走进人们的生活，助力国内汽车产业建立仿真测试标准。

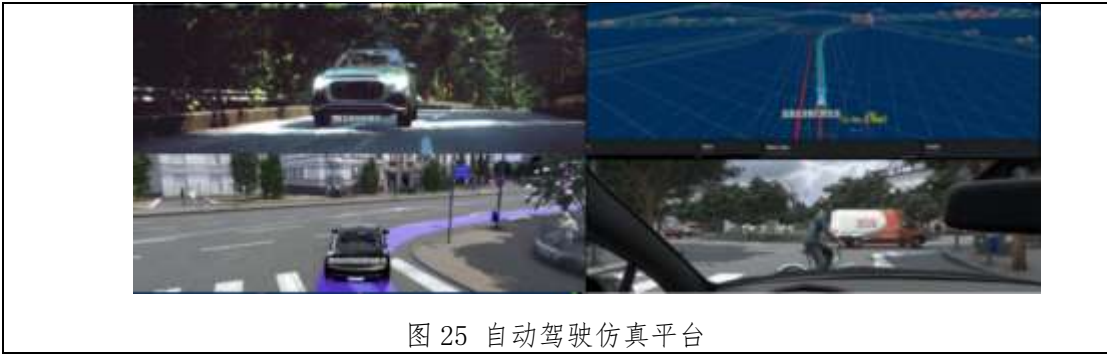


图 25 自动驾驶仿真平台

案例 临港无人驾驶基地和长沙智能网联测试区建设

在上海临港智能网联汽车综合测试区的建设过程中，利用数字孪生技术体系，通过低空航空摄影测量、实景三维建模、智能识别与分类语义化等技术，提供了快速准确制作低成本、可被机器理解的高精度地图处理技术，为自动驾驶方案商或车厂提供可靠和稳定更新的高精度地图数据支持。同时，在临港和长沙智能网联测试区可视化平台等车联网项目中，提供了高精度地图的发布和渲染引擎。



图 26 自动驾驶模拟仿真

（五）应急演练仿真：应急预案更加贴近实战

突发事件的发生往往措手不及，且事件的演变具有极大的不确定性，人类无法完全预测和消除事件的潜在威胁和现实的破坏，只能在力所能及的范围内尽可能减少突发事件带来的危害。利用数字孪生技术以及虚拟现实技术，可以给用户模拟一个真实发生的突发灾难的场景，例如火灾或暴雪等事件，让用户犹如身临其境，更加生动的体验在紧急事件发生时每个行动所带来的后果。

应急现场环境快速还原。采用新型测绘技术，快速还原地震、泥石流、滑坡等应急事故现场的环境，是应急指挥的基础条件。真实的直观的现场环境可为相关部门开展灾情研判、灾害分析、地质灾害排查、灾后重建等工作提供测绘级精度的保障，也为应急预案制定提供科学依据。

案例 受灾现场快速三维重建 为应急救援争分夺秒

2018年10月11日上午7时，金沙江流经的川藏交界处西藏昌都市江达县波罗乡宁巴村发生山体滑坡，造成断流，形成堰塞湖，危及人民群众生命财产安全。应急管理部立即启动应急响应，派出由地质灾害、救灾等单位以及专家组成的工作组赶赴现场。借助实景三维技术，以2台服务器实现了堰塞湖区域10cm分辨率生产周期低于一小时的自动三维建模，灾区现场的数字孪生环境成果，为相关部门开展灾情研判、灾害分析、地质灾害排查、灾后重建等工作提供测绘级精度的保障，也为应急预案制定提供科学依据。

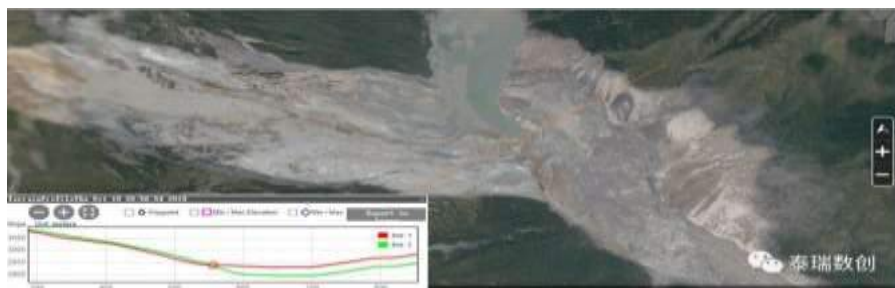


图 27 受灾现场三维重建

应急资源可视化管理。数字孪生平台可以通过可视化的界面形象的实时展示各种应急资源的位置、状态，并可基于空间实际地理坐标对可用应急资源进行查询。同时可以根据应急预案仿真的需求，为某一突发事件的应急预案提供底层的应急资源数据支持，以为后续根据应急预案模板生成具体的应急预案提供帮助。需要对重点建筑和重点区域细化场景模型，用来支持后续的应急事件和应急预案仿真流程。例如对可疏散区域，出入口，道路交通路网等进行建模。



图 28 室内消防设施信息实时映射



图 29 消防救援路线仿真

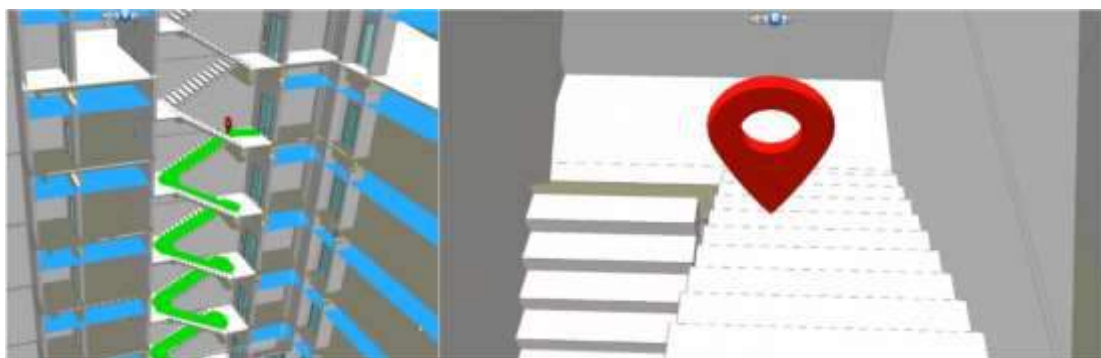


图 30 室内逃生路线仿真

应急预案科学仿真。按照“情景—应对”模式进行系统化的构建。一方面系统梳理出该类突发事件发生的场景，针对的具体目标与对象，在建立的功能性场景的基础上对应急事件本身进行建模，类别可包括自然灾害、事故、社会安全等。另一方面需要对某种具体的应对措施进行建模，需要包括该处置措施所涉及到的应急资源，对具体突发事件的效果等。建模完成的应急预案模板应存入应急预案数据库。通过在重点场所，重点建筑触发某种应急事件，或者是随机生成应急事件的方式开始应急预案的仿真，随之通过调用具体的应急预案模板，根据相关的应急资源分布的状况生成实际应急预案。通过三维模拟仿真技术对整个应急事件的处置全流程进行仿真，在仿真的过程中通过多种评价方式对每个具体的仿真流程，整体应急资源的准备情况，应急预案整体执行效率等进行多角度的评价。整个仿真的数据和评估报告应存入应急预案仿真结果和评价数据库。后续可以根据仿真的情况反馈若干预案和应急资源准备改进方案。

应急预案模拟演练。在微观方面，可以针对应急预案中的不同角色，对其承担的职责进行培训和演练，以达到评估优化预案和训练相关人员的目的。具体执行时，可触发某种突发事件，然后通过推送方式通知不同角色人员开始演练，不同角色人员根据模拟演练脚本的情况，根据自身的职责进行对应步骤的演练和下发，

模拟下发的应对步骤对应急事件本身产生的影响。整个模拟演练的日志和视频需记录并存入数据库，供后续对演练学员的表现进行定性和定量的评估。

案例 郑州智慧消防 打造 1-3-5 反应圈

基于数字孪生技术全面整理、融合消防应急数据和信息资源，统一管控消防信息，实现信息的快速查询、统计和分析。打造出 1-3-5 分钟快速反应圈，就近接警、快速处警，能够在最快的时间定位到火灾发生位置，将灾源周围的警力、人力、物力，灾害位置的建筑图纸、楼层分布、安全出口、逃生路线、救援路线、消防栓分布等信息以最快的时间汇总到指挥决策单位，让领导做到心中有数，让决策人员做到有据可查，为战士提供更加丰富的信息、更加全面理智的判断、更加合理的指挥意见，辅助现场人员进行火灾救援工作。提高灾害掌控能力、灾害分析能力、灾害救援能力，让人民群众更有安全感。同时，利用无人机将灾害现场视频在系统中在线实时展示，协助决策人员更全面的梳理与判断全局火情，快速进行灾害分析、情况预估、人员疏散、警力调配等决策。为作战人员提供更加丰富的资源，加快和提高指战人员的判断。



图 31 郑州消防应急指挥系统

（六）公共安全防范：让“雪亮”更“明亮”

借助“雪亮工程”、 警用地理信息系统（PGIS）等在建或已建

资源，依托数字孪生城市，实现公共安全应用场景的真实再现，通过接入各种传感信息，实现公共安全应用场景的实时动态监控，通过对海量公共安全数据进行整理、分析、挖掘、呈现，最终闭环的作用于物理世界，对城市公共安全具有全面透彻的感知、系统整体的掌控以及迅捷精确的响应，使公共安全治理主体能够信息共享、互联互通，形成一体化的预警防控体系。基于数字孪生技术的公共安全，是公共安全治理的新模式，具有对城市复杂性、流动性和连续性的适应能力，对服务主体的开放性、动态性管理的支持能力，对信息多源化、复杂化的融合能力，对海量数据整理分析挖掘的呈现能力。

案例：“上海公安大脑”助力社会治理

“上海公安大脑”采用实景三维建模技术构建上海市区 4000 平方公里的实景三维模型，采用语义化建模技术构建了 150 万栋重点建筑的单体模型，采用室内语义建模技术构建了 3000 万分层分户模型，最终在云端构建上海的全要素、精准的、结构化的数字孪生城市镜像，将城市粒度降到以户为单位。在此镜像上，通过集成建筑单元门禁、摄像头、烟感、煤气等传感器，以及街道上的“雪亮工程”摄像头、交通信号灯等室内外各种传感器，配上相应的处理模块，通过对人、车、物多维度、全方面感知，包括人脸识别、人群监测、智能巡屏、违章停车、消防联动、道路拥堵等，实现对入户嫌疑人识别跟踪、燃气泄漏实时预警、重点建筑及景点周边大客流应急处置等公共安全风险的及时识别、科学决策、准确指挥。

可以看到，采用数字孪生城市技术后，在公共安全领域，基于 AI 技术、算力的提升和数据超大规模汇聚，将散布在城市各个角落的监控摄像头等设备产生的数据连接起来，进行分析与整合，从而实现对城市的精准分析、整体研判、协同指挥，使“雪亮”工程更“明亮”。

（七）公共服务升级：感同身受的体验

在公共服务领域，数字孪生技术创新平台化模拟仿真和三维交互式体验，再造服务内容传播形式，显著提高服务供给质量和效率。典型如在医疗服务领域，数字孪生正在加快构建基于多维度生理指标的“数字化个体”，赋予医生“透视”诊断能力，提高医疗服务准确性。在公共教育领域，数字孪生技术将抽象的知识转化为基于数字平台的可视化模型，并且根据受教者的学习反馈表达，动态调节教育方案和计划，从而让知识更易于理解和高效传播。

“数字孪生个体”不断提升医疗就诊精准性。目前，面向个体的智能可穿戴设备越来越多，监测的生理指标范围也越来越大。比如智能手环、智能手表、智能体重秤、智能跑鞋等；与此同时，大型医疗诊断设备也在快速发展，医学成像、3D 器官打印、基因测序等技术日新月异，面向个体的生理认知正在不断深化，“数字孪生个体”正在局部领域得到应用。如医疗机构通过开展脑电图监测设备多导监测，对患者多个生理体征进行长时间实时监测，绘制脑电图、眼动图、肌电图、心电图、呼吸图等多维度数据立体画像。

案例 数字孪生技术下的辅助治疗手术

2018 年，武汉某医疗机构实施了一场全球首例混合现实（MR）技术引导下的骨折修复手术。患者通过 VR 能够 360 度全方位浏览自己骨折部位的 3D 数字“复制品”，对自己骨折的具体情况、手术方案进行了解。医生通过 MR 技术将虚拟的 3D 数字模型与患者病灶重叠在一起，在外科医生不充分开刀的情况下直观掌握病人的内部信息，并叠加显示在虚拟的物理空间上，实现精准的手术治疗方案制定。

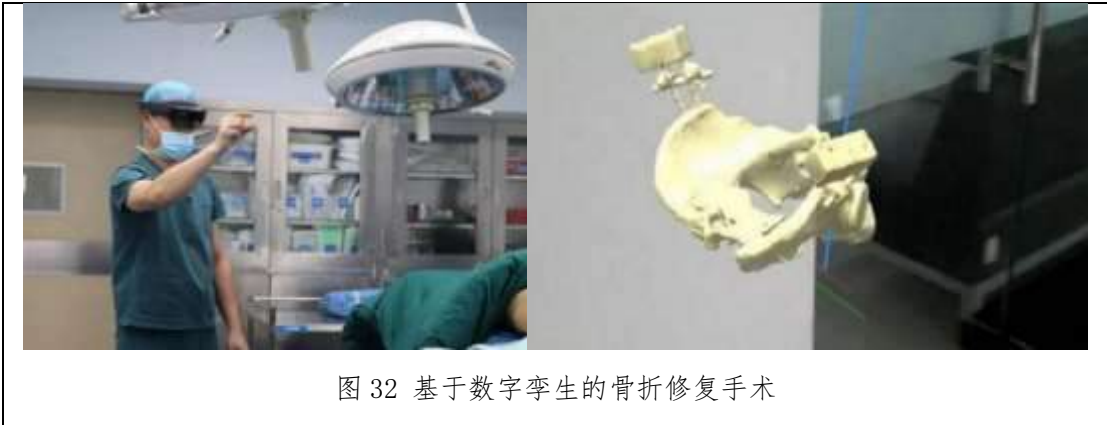


图 32 基于数字孪生的骨折修复手术

“数字孪生”让教育服务更加可感可视。在互联网和“数字孪生”技术的推动下，多媒体教学正在进一步升级演进，通过将数字课件中的知识点以声音、视频、图像等多种形式加以包装处理，让原本生涩难懂的知识点变得可感可视，信息转化和知识嫁接更为顺畅高效。如在医学课上，通过在数字孪生教学平台中“孪生”个体器官、局部组织，让学生高效学习掌握知识点和手术流程，如何处理突发手术意外和其他意外情况等。在工业实训基地等应用场景中，企业对关键设备、产品、加工生产线甚至整个车间进行在线模拟仿真和同步控制，便于培训对象直观掌握装备构造、生产加工流程、机械控制逻辑等内在信息。同时通过虚拟仿真和过程在线控制，实时分析企业生产管理、过程控制等运行效能，有助于降低系统开发和性能优化成本。

案例 威尔文教打造现代化 VR 超感教室

威尔文教基于虚拟显示、交互互动等创新技术，实现沉浸式感知、全方位体验的崭新教学模式。通过 VR 近眼显示系统播放 3D 视觉内容，实现立体化的观看和感知。通过幻境校园多媒体交互系统无线投屏，自定义分屏，体感操控，AI+生物识别，真正让知识点“动起来”，不再停留于书面，创新教育立体化场景沉浸式感知学习。

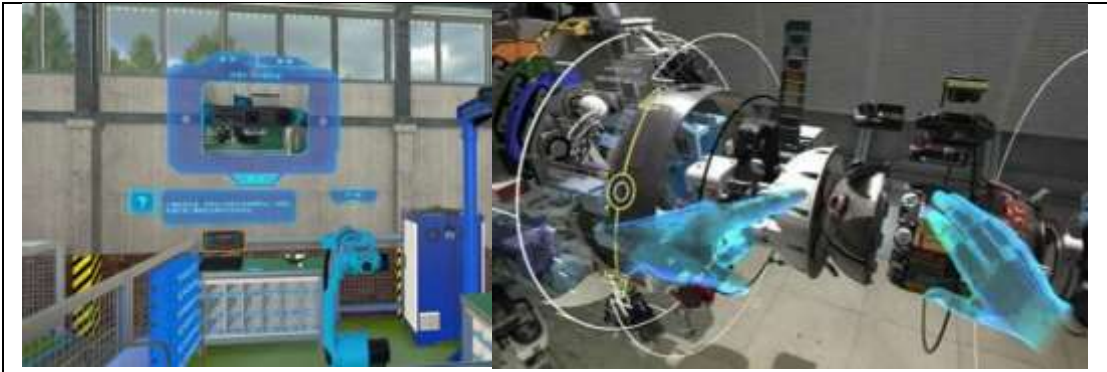


图 33 现代化 VR 超感教室

五、数字孪生城市未来发展展望

（一）有望全面激活智慧城市产业

数字孪生城市为产业带来新的发展动力。作为新型智慧城市建设的一种新理念新模式，数字孪生城市正带动更大产业力量和智力资源协同参与，形成城市级的创新平台，不仅激活拉动整个信息通信产业链共同发展，同时为其它行业以及一些基础性和应用型的技术指出了新的发展方向。数字孪生城市的虚实融合、精准映射特性对这些技术行业提出了新的要求，比如缩短地理测绘的周期、提高信息采集更新的频次、提升数据加载与图形渲染的速率、规范数据采集、融合的标准、增强实时数据的分析挖掘能力等等，做到海量数据的秒级发布、秒级出图和秒级响应。

传统产业入局机遇和挑战并存。从事新型测绘、地理信息、高精度定位等研发和产业化的企业，将考虑为数字孪生城市建立精确的城市骨架数字底图，并在此基础上能够高效集成全量数据；从事3D建模、BIM设计、游戏动画制作、可视化、场景渲染、虚拟现实之类的企业，将重点关注基于动态数据导入和静态数据导入的全要素的三维场景服务，如何在数字世界精准映射、准确表达物理世界的一花一草一举一动，表面的现象以及抽象的规则；从事仿真推演、

预警预测、数据挖掘、知识发现的相关企业，也将面对更为全量、实时、动态、异构的城市数据，考虑如何从中洞悉城市发展规律，发现问题并找到最优决策，这都是充满挑战的新课题。

智慧城市产业市场有望重新洗牌。数字孪生城市为智慧城市相关产业提供了一次重新洗牌的机会，更多的企业加入了进来参与建设。以互联网企业、电信运营商、设备制造商、系统集成商、软件开发商为代表的传统产业阵营，正以各种方式向数字孪生城市的建设方向加速转型。新进入的企业，尤其掌握城市信息模型和全要素三维场景服务关键技术的一批创新型企业，技术实力和业务市场也在快速提升和持续扩张，在数字孪生城市建设领域有望催生一批新的独角兽。智慧城市的产业市场竞争将更加激烈，未来谁能胜出占据主导地位，让我们拭目以待。

（二）有望重塑城市治理结构和规则

技术架构改变治理模式。由模型叠加数据、软件以及外围泛智能化设施构建的数字孪生城市，完全突破了智慧城市以往 IT 组件物理堆砌的架构方式，这种融合一体化整为零的技术架构，在支撑城市治理方面有几个得天独厚的优势，一是提供全景视角，城市多维度观测和全量数据分析，可深度透视抓取城市体征，洞察城市运行规律，从而实现精准施策；二是增进精细管理，360 度无死角监测监控，陆海空天全域立体感知，城市脉搏和呼吸尽在掌握，前后端扁平化洞穿，城市治理能够运筹帷幄之中决胜千里之外；三是提供协同手段，突发事件应急反应，全域协调联动，就近调度资源；四是促进科学决策，对城市发展态势提前推演预判，以数据驱动决策，以仿真验证决策，线上线下虚实迭代，促使资源和能力最优配置，城市最优化运行。

技术变革倒逼管理变革。数字孪生城市这种跨区域、跨部门、跨行业高效协同全景式的城市管理模式，与当前城市治理多头并举、条块分割、效率低下的管理方式具有天壤之别。从智慧城市到数字孪生城市，是一场深层次的技术革命，并将由技术革命倒逼管理革命，引发城市治理结构和治理规则的深层次变革。可以预见的是，为适应数字孪生城市的一盘棋管理模式，未来政府部门职能将做进一步调整，城市治理规则将做重大改变。一方面，城市管理相关部门可能合并实行大部制，以城市大脑为核心开展城市治理。另一方面，政府部门的人员也将进一步分化为虚实两大类职能，即一部分人在数字城市虚拟空间围绕数据行使城市管理和公共服务职能，另一部分则聚焦现实城市物理空间，在现场从事执法、调研、巡视等相关工作。

城市大脑需要专业化运营。作为数字孪生城市重要元素的城市大脑，其专业、高效的运营能力，决定了数字孪生城市是否能够可持续发展。城市大脑的运营不能单纯依赖政府部门力量，应联合社会各界力量汇聚众智，组建由政府管理、业务运营、平台运营、数据运营、安全运营于一体的数字孪生城市治理专业化运营队伍，以管理一盘棋、服务一站式为原则，建立长效运营机制，制定城市运行相关的业务应用、平台运营、数据运营、技术运维等流程和规范，最大限度地释放数字孪生技术红利，推动城市向自我优化、自我决策、内生发展的高度智能的现代化治理体系演进。

（三）数字孪生城市的推进实施建议

加快多元异构数据资源整合。数字孪生城市在城市信息模型之上集成了城市的全量大数据，包括动态数据和静态数据，政务数据和社会数据，历史数据和推演数据，这些多元异构数据统统作为实

体的属性加载到城市信息模型之上。因此城市级的数据共享融合，形成无所不包的城市大数据，为数据驱动的治理模式夯实基础，是数字孪生城市成功的关键因素。当前各省市都在进行政务信息资源的共享整合，部分地区基本整合完毕，大部分地区还在整合过程中，但仅有政务数据，并不能满足数字孪生城市的治理需求，重点领域的社会数据，以及实时采集的物联网数据，应尽快整合进入数据资源体系，融入城市信息模型，为数字孪生城市的运行做好准备。

成熟管理系统嫁接三维信息模型。在大学校园、产业园区、经济开发区等一些封闭的功能区，一般都建设并运行着成熟的管理系统，负责设施的管理、资源的管理、人员的管理和业务的运转。通过将这些封闭的区域进行实景三维建模，建立区域信息模型，并将已经成熟运行的管理系统叠加到信息模型之上，以信息模型集成各类数据并对管理系统进行适当重塑，将实现从二维到三维、从平面到立体、从静态到动态的升级，如虎添翼、事半功倍，大大提升管理能力，使管理更加可视化、精细化、智能化。可以预见的是，越来越多的管理系统将与三维信息模型进行嫁接，实现管理能力的快速升级。

从局部走向全域、从粗犷走向细腻，从映射走向操控。受管理难度和技术成本影响，数字孪生将从社区、园区、校园、港口等小范围的封闭区域开始，逐步向城市全域、城乡一体化以及陆海空天一体化的孪生大世界过渡。此外，数字孪生程度不断深化，实景三维模型的精密度将由满足普通的城市管理向满足人工智能算法训练的高精度演进，实时渲染的效果也更加真实，比如 24 小时昼夜变换，夜晚、清晨/黄昏、白天的效果，天空光的颜色和强度，天气变化和自动光照变化的效果将逼真呈现，达到仿真的“镜像”效果。当前，

数字孪生城市建设重点还聚焦于对物理城市的精准映射，未来建设重心将向对物理城市的智能操控转变。

CAICT 中国信通院

中国信息通信研究院

地址：北京市海淀区花园北路 52 号

邮政编码：100191

联系电话：010-68026827

传真：010-62304980

网址：www.caict.ac.cn

